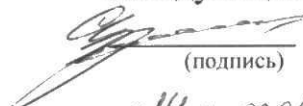


Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА, ГЕОЛОГИИ И ГЕОТЕХНОЛОГИИ
(институт)
ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ГОРНО – МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО
ПРОИЗВОДСТВА
(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 С.В. Кузьмин
(подпись) (инициалы, фамилия)
«14» февраля 2018г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

21.05.04. Горное дело

(код и наименование специальности)

21.05.04.10 Электрификация и автоматизация горного производства

(код и наименование специализации)

«Разработка и внедрение лаборатории по курсу «Электромагнитная
обстановка и электромагнитная совместимость на подстанциях».

Проектирование, монтаж, наладка и методическое обеспечение лабораторной
работы «Оценка электрических параметров земли».
(тема)

Пояснительная записка

Руководитель


(подпись, дата)

К.Т.Н., доцент
(должность, ученая степень)

С.В. Кузьмин
(инициалы, фамилия)

Выпускник


(подпись, дата)

К.В. Логинов
(инициалы, фамилия)

Красноярск 2018г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа на тему: «Разработка и внедрение лаборатории по курсу «Электромагнитная обстановка и электромагнитная совместимость на подстанциях». Проектирование, монтаж, наладка и методическое обеспечение лабораторной работы «Оценка электрических параметров земли» содержит 167 лист, 42 рисунков, 42 таблицы, 4 источников, 9 листов формата А1 графического материала.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА, ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ, КОНТРОЛЬНЫЙ КАБЕЛЬ, РАЗРАБОТКА, МОНТАЖ, НАЛАДКА И АПРОБАЦИЯ СТЕНДА, ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА, МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.

Объектом дипломной работы является лабораторная установка для оценки электропроводности грунта и оценки сопротивления заземления.

Цель работы: изучение метода ВЭЗ для определения параметров двухслойной модели и эквивалентного удельного электрического сопротивления земли

В процессе работы проведены: анализ методов измерения электропроводности грунта и методов оценки заземляющих устройств, разработка конструкции стенда, монтаж, наладка и апробация работы стенда; разработка методического обеспечения по выполнению лабораторной работы; выполнение условий безопасности жизнедеятельности при монтаже и наладке лабораторного стенда; разработка сетевого графика создания стенда для своевременного завершения работ.

Использование установки в лабораторном практикуме поможет студентам в закреплении теоретических знаний по тематике лекционного материала дисциплины «Электромагнитная обстановка и электромагнитная совместимость на подстанциях».

<u>Введение</u>	7
<u>1. Общие технические и проектные решения по разработке и внедрению лаборатории по курсу «Электромагнитная обстановка и электромагнитная совместимость на подстанциях»</u>	10
<u>1.1 Актуальность разработки лаборатории по курсу «Электромагнитная обстановка и электромагнитная совместимость на подстанциях»</u>	10
<u>1.2 Описание лаборатории по курсу «Электромагнитная обстановка и электромагнитная совместимость на подстанциях»</u>	17
<u>1.3 Схема электроснабжения и приборный парк лаборатории</u>	31
<u>1.4 Вывод по разделу 1</u>	34
<u>2 Анализ методов измерения электропроводности грунта и методов оценки заземляющих устройств</u>	35
<u>2.1 Анализ методов измерения электропроводности грунта</u>	35
<u>2.1.1 Электрическое сопротивление земли</u>	35
<u>2.1.2 Зависимость ρ грунта от влажности</u>	36
<u>2.1.3 Зависимость ρ грунта от температуры</u>	39
<u>2.1.4 Влияние рода грунта на его удельное сопротивление</u>	42
<u>2.1.5 Зависимость ρ грунта от его уплотненности</u>	44
<u>2.1.6 Зависимость ρ грунта от времени года</u>	45
<u>2.1.7 Методы измерения удельного сопротивления грунта</u>	49
<u>2.1.7.1 Методом разового зондирования</u>	49
<u>2.1.7.2 Метод послойного зондирования</u>	50
<u>2.1.7.3 Метод вертикального электрического зондирования</u>	55
<u>2.1.7.4 Двухполюсная установка</u>	58
<u>2.1.7.5 Трехполюсная установка Гуммеля</u>	59
<u>2.1.7.6 Трехполюсная установка Шлюмбеже</u>	59
<u>2.1.7.7 Четырехполюсная установка</u>	60
<u>2.1.7.8 Четырехполюсная установка Веннера</u>	61
<u>2.1.7.9 Четырехполюсная установка Шлюмберже</u>	61
<u>2.1.7.10 Симметричная четырехполюсная установка Шрюмберже</u>	62
<u>2.1.7.11 Установка Бургсдорфа или метод “амперметра – вольтметра”</u>	63

<u>2.2 Анализ методов оценки сопротивления заземляющих устройств подстанций</u>	68
<u>2.2.1 Метод непосредственного измерения сопротивления заземления</u>	69
<u>Измерение сопротивления заземляющего устройства выполняют по методу амперметра-вольтметра. Принципиальная схема измерений приведена на (рис. 2.12).</u>	69
<u>2.2.2 Расчетные методы оценки сопротивления заземляющих устройств</u>	73
<u>2.2.2.1 Метод оценки сопротивления одиночных заземлителей</u>	73
<u>2.2.2.2 Оценка сопротивления сложного заземлителя в однородной земле</u>	75
<u>2.2.2.3 Групповой заземлитель в двухслойной земле</u>	80
<u>2.2.2.4 Метод определения сопротивления заземляющего устройства с учетом коэффициента эксплуатации</u>	83
<u>2.3 Выводы по второму разделу</u>	84
<u>3 Компьютерное моделирование схемы стенда по оценке электрических параметров земли и заземляющих устройств</u>	85
<u>3.1 Моделирование метода вертикального электрического зондирования для измерения электропроводности грунта</u>	86
<u>3.2 Моделирование метода «Амперметра – вольтметра» для измерения сопротивления заземляющего устройства</u>	92
<u>3.3 Выводы по третьему разделу</u>	95
<u>4 Разработка конструкции стенда, монтаж, наладка и апробация работы стенда</u>	96
<u>4.1 Разработка дизайна и конструкции стенда</u>	96
<u>4.2 Выбор рабочего напряжения и автоматического выключателя</u>	99
<u>4.3 Разработка принципиальных электрических и монтажных схем стенда</u>	100
<u>4.4 Выбор необходимых измерительных приборов и оборудования</u>	103
<u>4.5 Апробация реальной схемы стенда</u>	106
<u>4.5.1 Алгоритм измерения и расчета электропроводности грунта методом ВЭЗ</u>	106
<u>4.5.2 Алгоритм оценки сопротивления заземления подстанции</u>	113
<u>4.6 выводы по четвертому разделу</u>	118
<u>5 Разработка методического обеспечения по выполнению лабораторной работы «Оценка электрических параметров земли»</u>	119

<u>5.1 Методические указания к лабораторной работе: «Оценка электрических параметров земли»</u>	119
<u>5.1.1 Введение.....</u>	122
<u>5.1.2 Техника безопасности при работах в лаборатории</u>	122
<u>5.1.3 Общие указания по оформлению отчетов</u>	123
<u>5.1.4 Общие положения</u>	124
<u>5.1.5 Термины и определения</u>	132
<u>5.1.6 Теоретические основы метода вертикального электрического зондирования</u>	135
<u>5.1.7 Лабораторная работа «Оценка электрических параметров земли»</u>	142
<u>5.2 Возможные варианты выполнения лабораторной работы с исходными данными и полученными результатами.....</u>	151
<u>6 Выполнение условий безопасности жизнедеятельности при монтаже и наладке лабораторного стенда</u>	153
<u>6.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов</u>	153
<u>6.2 Технические и организационные мероприятия по охране труда.....</u>	154
<u>6.3 Мероприятия по производственной санитарии</u>	156
<u>6.4 Мероприятия по пожарной и взрывной безопасности</u>	157
<u>7 Разработка сетевого графика</u>	159
<u>Заключение.....</u>	162
<u>Список используемой литературы</u>	164

Введение

Широкое использование микропроцессорной техники на подстанции напряжением 110кВ и выше требует решение вопроса электромагнитной совместимости с оборудованием подстанции и режимам ее работы. К режимам работы относится: нормальный режим работы и аварийные режимы.

Аварийный режимы включают в себя: режим короткого замыкания и эксплуатация подстанции во время грозовой активности [1] Известно, что импульсные магнитные поля, возникшие в режиме короткого замыкания, негативно влияет на работоспособность микропроцессорных устройств. Возникновение однофазного короткого замыкания на открытом распределительном устройстве подстанции или разряд молнии в молнии приемнике приводит к росту потенциала на заземляющее устройство. Экраны контрольных кабелей, проложенных по территории открытого распределительного устройства, заземлены с обеих сторон. Возросший потенциал на устройстве приводит к пробое изоляции на кабеле за счет обратного напряжения, что вызывает срыв функционирования микропроцессорных устройств.

Короткое замыкание и разряд молнии сопровождается высокочастотными составляющими тока, в следствии этого за счет емкостной проводимости изоляции кабеля и устройств на входе(порт) микропроцессорных терминалов может возникнуть напряжение способное вывести из строя микропроцессоры.

Разность потенциалов, на заземляющем устройстве на прямую зависит от сопротивления заземления и сопротивление металосвязи. Металосвязь оказывает шунтирующий эффект и выравнивание потенциалов. Шунтирующий эффект связан с электропроводностью грунта и продольным горизонтальных заземлителей. Очевидно, что чем меньше сопротивление заземляющего устройства и электропроводности грунта, тем меньше потенциал на заземляющем устройстве и эффективно проявляется шунтирующее действие горизонтальных заземлителей. Это снижает негативное воздействие

потенциалов заземляющего устройства на работоспособность микропроцессорных систем. Таким образом, изучение студентами методов измерения электрических параметров земли и заземляющих устройств является актуальной задачей.

Целью настоящей дипломной работы является разработка стенда по изучению методов: измерение основных параметров земли и заземляющего устройства. К основным параметрам земли относится электропроводность грунтов, а основным параметром заземляющего устройства является сопротивление растекания тока с заземляющего устройства (сопротивление заземления) и потенциал на заземляющем устройстве.

Таким образом, при разработке стенда необходимо решить следующие задачи:

- 1) Изучить и освоить метод вертикально электрического зондирования для определения электропроводности грунта.
- 2) Изучить и освоить метод “амперметра и вольтметра” для оценки сопротивления заземляющего устройства.

Исходя из этого дипломная работа будет состоять из следующих частей – введения;

Первая часть – разработка лаборатории по курсу “Электрозащитная обстановка и электрическая совместимость на подстанциях.

Вторая часть - анализ методов измерения электропроводности грунта и анализ методов оценки сопротивления заземляющего устройства.

Третья часть - теоретическая разработка, и компьютерное моделирование схемы стенда по оценке электрических параметров земли и заземляющих устройств;

Четвертая часть - разработка конструкции стенда, монтаж наладка, и апробация работы стенда;

Пятая часть - разработка методического обеспечения по выполнению лабораторных работ, связанных с оценкой электрических параметров земли и заземляющих устройств;

Шестая часть - раздел БЖД при монтаже и наладке лабораторного стенда;

Седьмая часть - экономическая часть связанная с разработкой сетевого графика по созданию лабораторного стенда.

1. Общие технические и проектные решения по разработке и внедрению лаборатории по курсу «Электромагнитная обстановка и электромагнитная совместимость на подстанциях»

1.1 Актуальность разработки лаборатории по курсу «Электромагнитная обстановка и электромагнитная совместимость на подстанциях»

Учебной программой подготовки специалистов по направлению «Электрификация и автоматизация горных работ» предусмотрена дисциплина «Электромагнитная обстановка и электромагнитная совместимость на подстанциях». Изучение данной дисциплины связано с широким внедрением микропроцессорной техники на ПС. Использование МП техники позволяет коренным образом изменить функционирование подстанций. Защиты выполненные на МПУ становятся универсальными, занимают небольшие пространства, позволяют выполнять резервирование, что приводит к повышению надежности подстанции в целом.

Опыт эксплуатации МПУ на ПС показал, что надежная работа устройств обеспечивается соответствующей электромагнитной обстановкой и электромагнитной совместимостью с режимами работы и оборудованием подстанций. Основные требования для МПУ приведены в таблице 1.1

Таблица 1.1 – Виды испытаний на помехоустойчивость и помехоэмиссию вторичного оборудования и рекомендуемые степени жесткости

№ п/п	Вид электромагнитных воздействий и испытаний на помехоустойчивость	Нормативный документ	Степень жесткости испытаний (тип соединения)	Параметр	Примечание
1	2	3	4	5	6
1	Напряжения и токи промышленной частоты при КЗ на землю. Испытания электрической прочности изоляции (напряжение в установившемся режиме) и импульсным напряжением.	ГОСТ 30328-95 МЭК 60255-5		2000В переменного тока	Для всех портов питания и для портов проводных цепей, выходящих на РУ

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6
	Порт корпуса				
2	Магнитные поля промышленной частоты от силового оборудования в нормальных и аварийных режимах. На устойчивость к воздействию магнитного поля промышленной частоты	ГОСТ Р 50648-94 (МЭК 61000-4-8).	5 степень	100А/м(длительно) 1000А/м (кратковременно)	Для устройств чувствительных к магнитным полям
			2 степень	3А/м (длительно)	Для мониторов с электроннолучевой трубкой
3	Электромагнитные поля радиочастотного диапазона от внешних и внутренних устройств связи. На устойчивость к излучаемым радиочастотным электромагнитным полям	ГОСТ Р 51317.4.3-99 (МЭК 6100-4-3)	Не ниже 3 степени	10В/м	Для всех устройств
4	Импульсные магнитные поля от молнии и первичных цепей. На устойчивость к импульсному магнитному полю.	ГОСТ Р 50649-94 (МЭК 61000-4-10-93)	Не ниже 4 степени	300А/м	Для устройств чувствительных к магнитным полям
5	Разряды статического электричества с персонала. На устойчивость к разрядам статического электричества	ГОСТ Р 51317.4.2-99 (МЭК 61000-4-2-95, МЭК 60255-22-2-96)	Не ниже 3 степени жесткости	6кВ контактный 8кВ воздушный	Для всех устройств.
	Сигнальные порты				
6	Импульсные помехи, возникающие при коммутациях силового оборудования и КЗ на первичной стороне. На устойчивость к колебательным затухающим помехам.	ГОСТ Р 51317.4.12-99 (МЭК 61000-4-12-96)	Локальное Полевое 3степень (для однократных) 2 степень (для повторяющихся) <u>С оборудованием</u> 4 степень (для однократных) 3 степень (для повторяющихся)	2кВ(провод-земля), 1кВ (провод-провод) 1кВ(провод-земля), 0,5кВ (провод-провод) 4кВ(провод-земля), 2 кВ (провод-провод) Противофазное 2,5кВ(провод-земля), 1 кВ (провод-провод)	Для всех устройств

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6
7	Импульсные помехи от токов молнии. На устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии	ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК61000-4-5-95)	Локальное Провод-земля 2 степень Провод-провод 1 степень Полевое Провод – земля 3 степень Провод-провод 2 степень С оборудованием Провод земля 4 степень Провод – провод 3 степень	1кВ 0,5кВ 2кВ 1кВ 4кВ 2кВ	Для всех устройств.
8	Наносекундные импульсные помехи от электромеханических устройств в системах электропитания постоянного и переменного тока. На устойчивость к наносекундным импульсным помехам.	ГОСТ Р 51317.4-4-99 (МЭК 60255-22-4).	Локальное 3 степень Полевое 4 степень С оборудованием Специальная степень жесткости	1кВ 2кВ 4кВ	Для всех устройств
9	На устойчивость к кондуктивным помехам, в полосе частот от 150кГц до 80МГц.	ГОСТ Р 51317.4.6-99 (МЭК 61000-4-6-96)	3 степень	10В	Для всех сигнальных портов.
	Питание постоянным током				
10	Провалы напряжения Прерывания напряжения	МЭК 61000-4-29	30%(1с) 60%(0,1с) 100%(0,5с)		Только для входных портов

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6
11	На устойчивость к пульсациям напряжения постоянного тока.	ГОСТ Р 51317.4.17-2000 (МЭК 61000-4-17-99).	Не ниже 3 степени	Пульсации не выше 10%	Для всех портов питания постоянного тока
12	Кондуктивные помехи от внешних и внутренних источников. На устойчивость к кондуктивным помехам в полосе от 0 до 150 кГц	ГОСТ Р 51317.4.16-2000 (МЭК 61000-4-16-96)	Не ниже 3 степени	10В (длительно) 100В (1 с)	Для всех портов питания постоянного тока
13	Импульсные помехи от токов молнии. На устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии.	ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95).	Провод земля 3 степень Провод-провод 2степень	2кВ 1кВ	Для всех портов питания постоянного тока
14	Наносекундные импульсные помехи от электромеханических устройств в системах электропитания постоянного и переменного тока. На устойчивость к наносекундным импульсным помехам.	ГОСТ Р 51317.4-4-99 (МЭК 61000-4-4-95, МЭК 60255-22-4).	4 степень	4кВ	Для всех портов питания постоянного тока
15	Кондуктивные помехи от внешних и внутренних источников. На устойчивость к кондуктивным помехам, в полосе от 150кГц до 80МГц.	ГОСТ Р 51317.4.6-99 (МЭК 61000-4-6-96)	3 степень	10В	Для всех портов питания постоянного тока
16	Импульсные помехи, возникающие при коммутациях силового оборудования и КЗ на первичной стороне. На устойчивость к колебательным затухающим помехам.	ГОСТ Р 51317.4.12-99 (МЭК 61000-4-12)	4степень (для однократных) 3 степень (для повторяющихся)	4кВ (провод-земля) 2кВ (провод-провод) 2,5кВ (провод-земля), 1 кВ (провод-провод)	Для всех портов питания постоянного тока

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6
	Питание переменным током				
17	Провалы напряжения Прерывания напряжения	МЭК 61000-4-29	30%(50периодов) 60%(1 период) 100%(5периодов)		Только для входных портов
18	На устойчивость к гармоникам и интергармоникам, к сигналам систем телеуправления и сигнализации в напряжении сети переменного тока.	ГОСТ 29280-92 (МЭК 61000-4, МЭК 61000-4-13).	В соответствии с рекомендациями СТО 56947007-29.240.044-2010		Для всех портов питания переменного тока.
	На устойчивость к колебаниям напряжения	ГОСТ Р 51317.4.14-2000 (МЭК 61000-4-14-2000).			
	На устойчивость к динамическим изменениям напряжения электропитания	ГОСТ Р 51317.4.11-99 (МЭК 61000-4-11-94).			
19	На устойчивость к изменениям частоты питания в сети переменного тока	ГОСТ Р 51317.4..28 - 2000 (МЭК 61000-4-28-2000).			
20	На устойчивость к кондуктивным помехам, в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц..	ГОСТ Р 51317.4.6-99 (МЭК 61000-4-6-96).	Не ниже 3 степени	10В	Для всех портов питания переменного тока
21	Импульсные помехи, возникающие при коммутациях силового оборудования и КЗ на первичной стороне. На устойчивость к колебательным затухающим помехам.	ГОСТ Р 51317.4.12-99 (МЭК 61000-4-12)	4степень (для однократных) 3 степень (для повторяющихся)	4кВ(провод – земля) 2кВ (провод-провод) 2,5кВ (провод-земля), 1кВ (провод-провод)	Для всех портов питания переменного тока
22	На устойчивость к наносекундным импульсным помехам	ГОСТ Р 51317.4-4-99 (МЭК 61000-4-4-95, МЭК 60255-22-4).	4степень	4кВ	Для всех портов питания переменного тока

Окончание таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6
23	Импульсные помехи от токов молнии. На устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии.	ГОСТР 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-96).	Провод -земля 4 степень Провод-провод 3 степень	4кВ 2кВ	Для всех портов питания переменного тока.
	Порт функционального заземления				
24	На устойчивость к наносекундным импульсным помехам (ввод помехи применением емкостных клещей связи)	ГОСТ Р51317.4-4-99 (МЭК 61000-4-4-95, МЭК 60255-22-4).	4 степень	4кВ	Требования применяются к соединениям с функциональным заземлением, отделенным от защитного заземления
25	Кондуктивные помехи от внешних и внутренних источников. На устойчивость к кондуктивным помехам, в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц..	ГОСТР 51317.4.6-99 (МЭК 61000-4-6-96).	Не ниже 3 степени	10В	10В=140дБ
	Помехоэмиссия				
26	Радиопомехи от оборудования. Помехоэмиссия	ГОСТР 51318.22- 99 (СИСПР 22 - 97) ГОСТР 51318.11-99 (СИСПР 11- 97)			

Анализ таблицы 1.1 указывает на то, что применение МПУ допускается после выполнения обследования электромагнитной обстановки на ПС. Комплексное обследование электромагнитной обстановки на ПС выполняется в следующих направлениях:

1. Диагностика заземляющего устройства (ЗУ).
2. Анализ эффективности систем молниезащиты.
3. Устойчивость МПУ к режимам КЗ и ударам молнии.
4. Измерение, расчеты и анализ влияния электромагнитных полей на функционировании МПУ.
5. Изучение влияния импульсных электромагнитных полей и качества электрической энергии на работоспособность МПУ.
6. Влияние качества источников постоянного тока на состояние МПУ.

Методы измерения параметров ЭМО и методика их анализа приведена в СО 34.35.311-2004 «Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях»; СТО 56947007-29.240.044-2010 «Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства»; СТО 56947007-29.130.15.105-2011 «Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок».

Данные материалы позволяют разработать лабораторию по дисциплине «Электромагнитная обстановка и электромагнитная совместимость на ПС». Наличие данной лаборатории является актуальным, так как позволяет привить навыки и умения студентам по основным направлениям, связанным с изучением ЭМО и ЭМС на подстанциях. Получение знаний и навыков в данной области в дальнейшем позволят студентам получить комплексные знания по специализации электрификация и автоматизация горных работ, что положительно отразится на их профессиональной деятельности.

1.2 Описание лаборатории по курсу «Электромагнитная обстановка и электромагнитная совместимость на подстанциях»

Лаборатория по курсу «Электромагнитная обстановка и электромагнитная совместимость на подстанциях» расположена на 3 этаже учебного корпуса института горного дела геологии и геотехнологий СФУ в аудитории 307. Общая площадь лаборатории составляет 48,9м². Внешний вид помещения до расположения оборудования и стендов лаборатории показан на рисунке 1.1.





Рисунок 1.1 – Внешний вид аудитории 307 до создания лаборатории

Для проведения лабораторных работ по курсу ЭМО и ЭМС были разработаны следующие стенды:

1. «Оценка качества электропитания источника постоянного тока»
2. «Оценка и измерение основных параметров качества электрической энергии в сетях до 1000В»
3. «Измерение электропроводности грунта», «Измерение сопротивления заземления»
4. «Определение металловязи и напряжения прикосновения»
5. «Оценка термической устойчивости экранов контрольных кабелей на основе имитации режима КЗ»
6. «Оценка воздействий высокочастотной составляющей тока КЗ на работоспособность МПУ»

Внешний вид лицевых панелей перечисленных стендов показан на рисунках 1.2 - 1.7.

Внешний вид лаборатории с установленными стендами показан на рисунках 1.8 - 1.9.

Стенд №1 . «Оценка качества электропитания источника постоянного тока».

Позволяет оценить основные показатели качества источника постоянного тока, к которым относятся: отклонение напряжения, размах и пульсация выпрямленного напряжения. Данный стенд наглядно показывает, как влияет схема источника постоянного тока на качество электропитания. Кроме того данный стенд демонстрирует как изменяется качество электропитания источника постоянного тока при использовании LC фильтров и аккумуляторных батарей. С помощью стенда, можно проследить, какие изменения происходят в выпрямленном напряжении в случае выхода из строя силовых диодов. Методическое обеспечение данного стенда включает 6 вариантов выполнения работы.

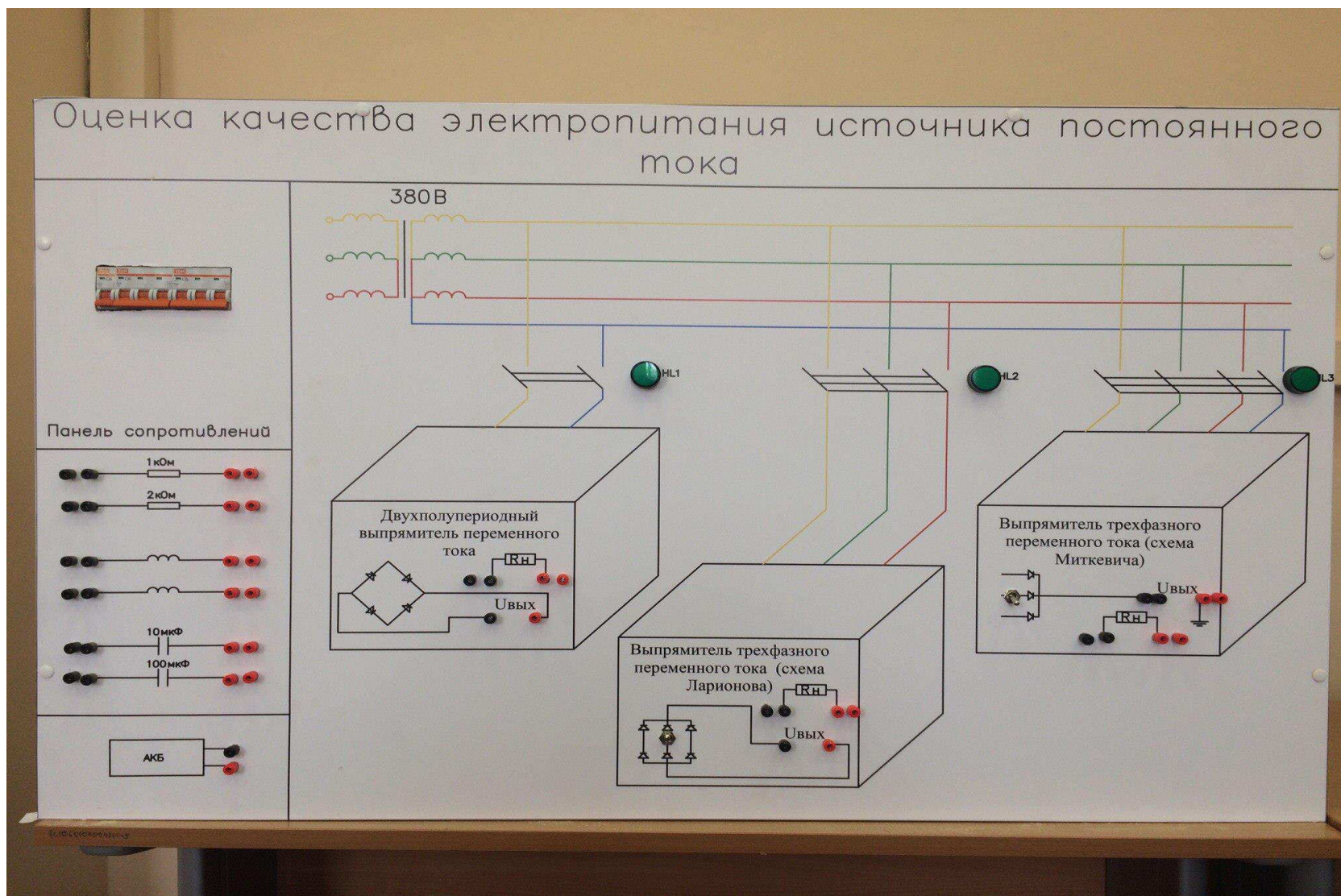


Рисунок 1.2 – Лицевая панель стенда «Оценка качества электропитания источника постоянного тока»

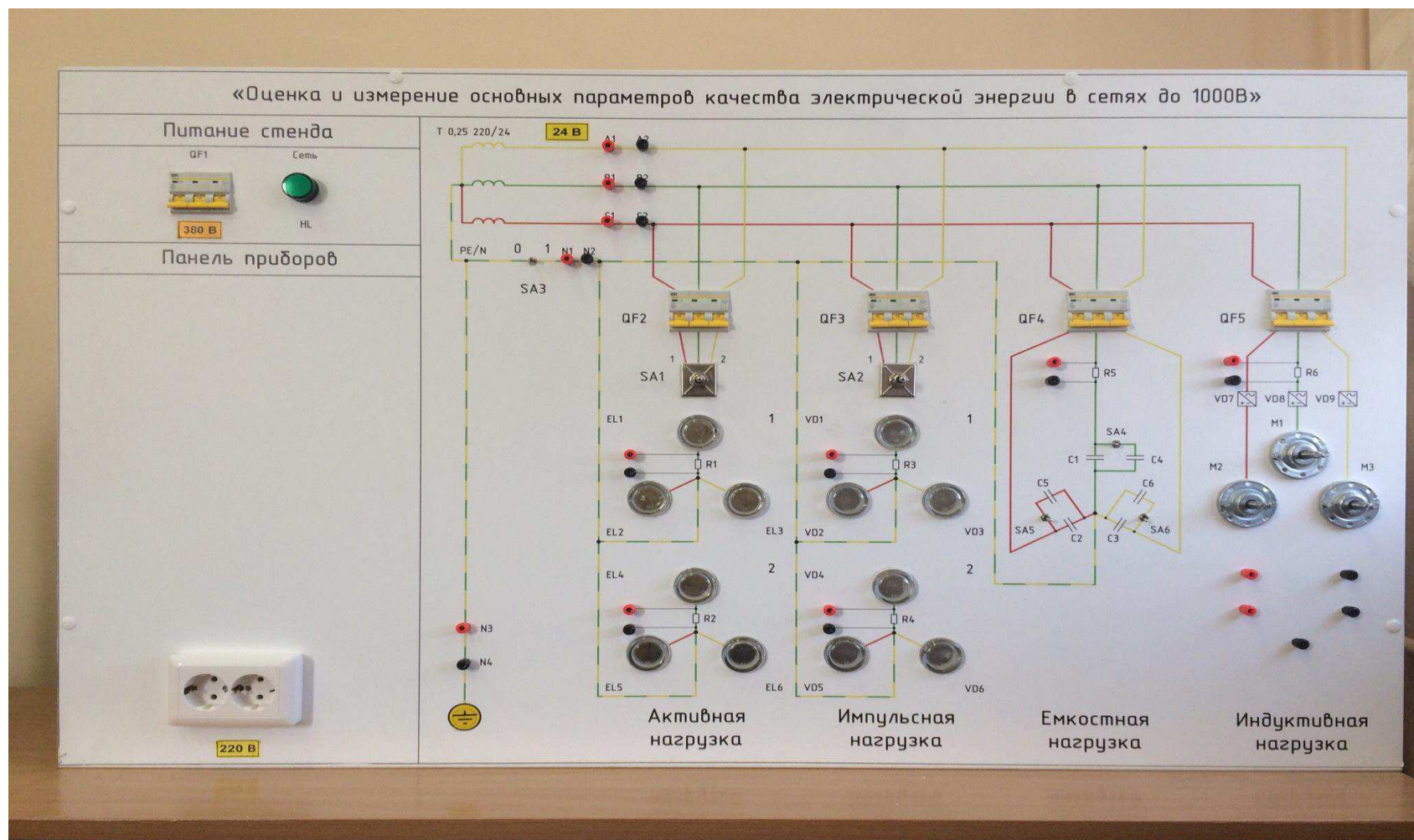


Рисунок 1.3 – Лицевая панель стенда «Оценка и измерение основных параметров качества электрической энергии в сетях до 1000В»

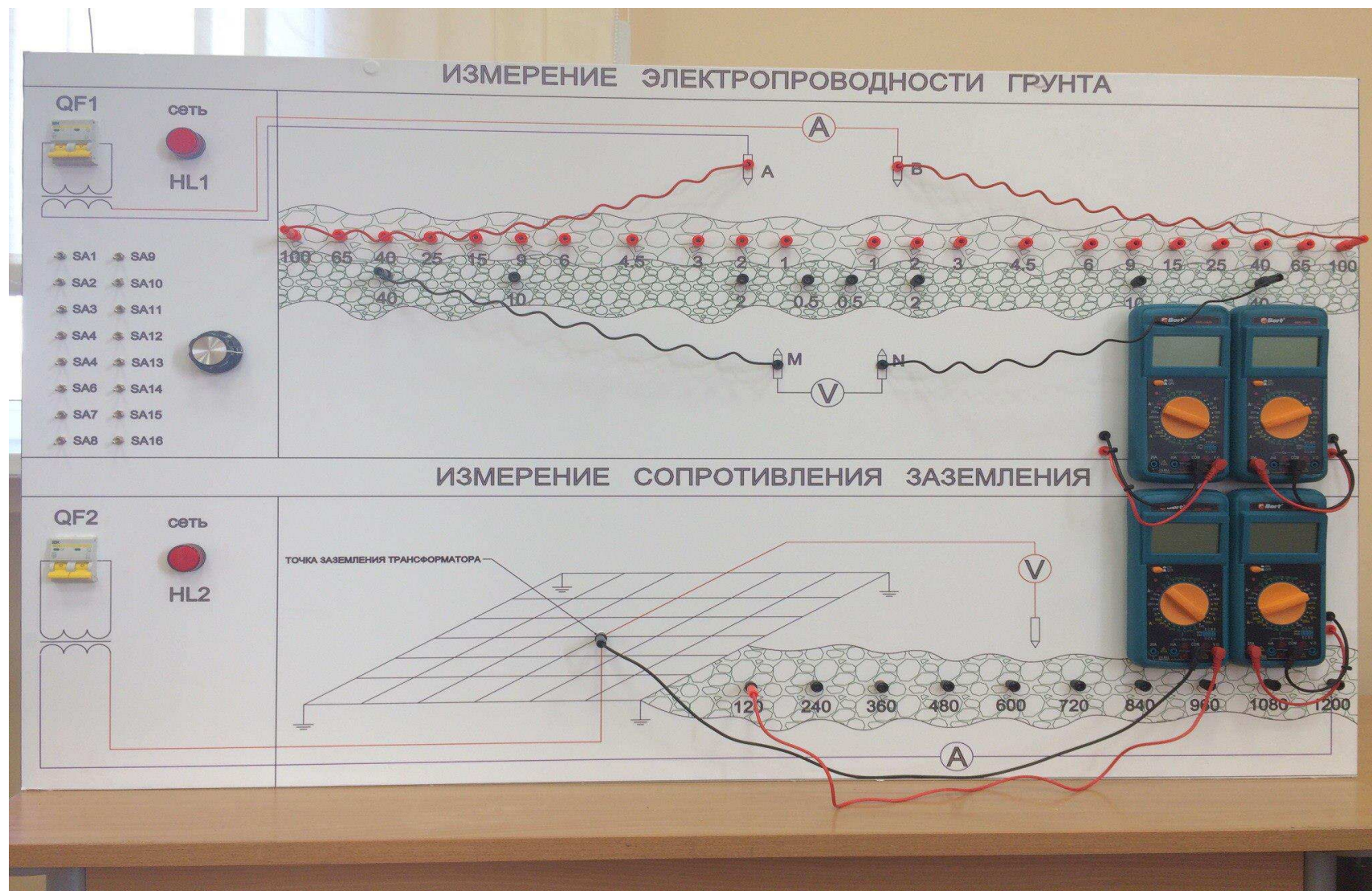


Рисунок 1.4 – Лицевая панель стенда «Измерение электропроводности грунта», «Измерение сопротивления заземления»



Рисунок 1.5 – Лицевая панель стенда «Определение металlosвязи и напряжения прикосновения»

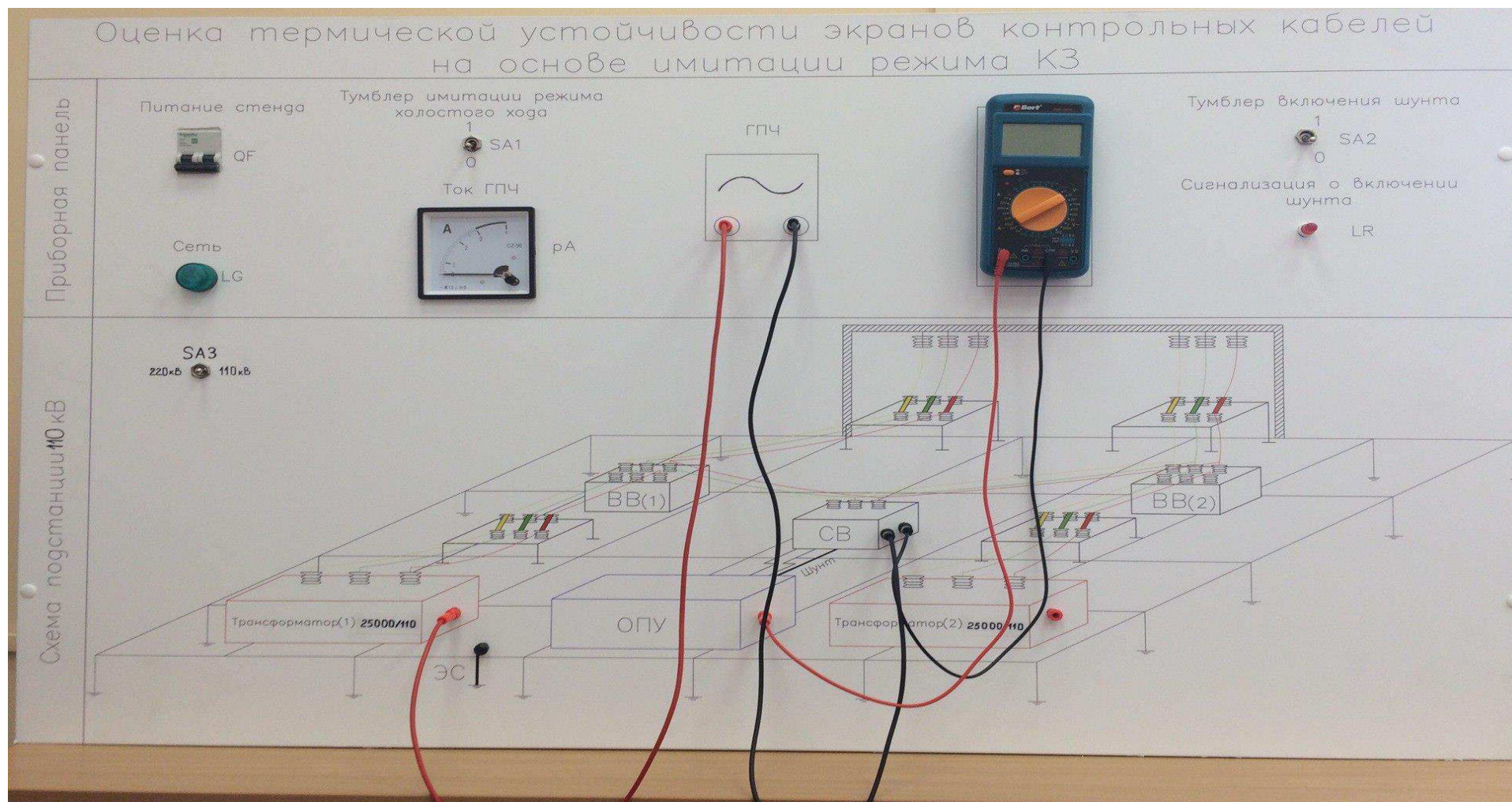


Рисунок 1.6 – Лицевая панель стенда «Оценка термической устойчивости экранов контрольных кабелей на основе имитации режима КЗ»

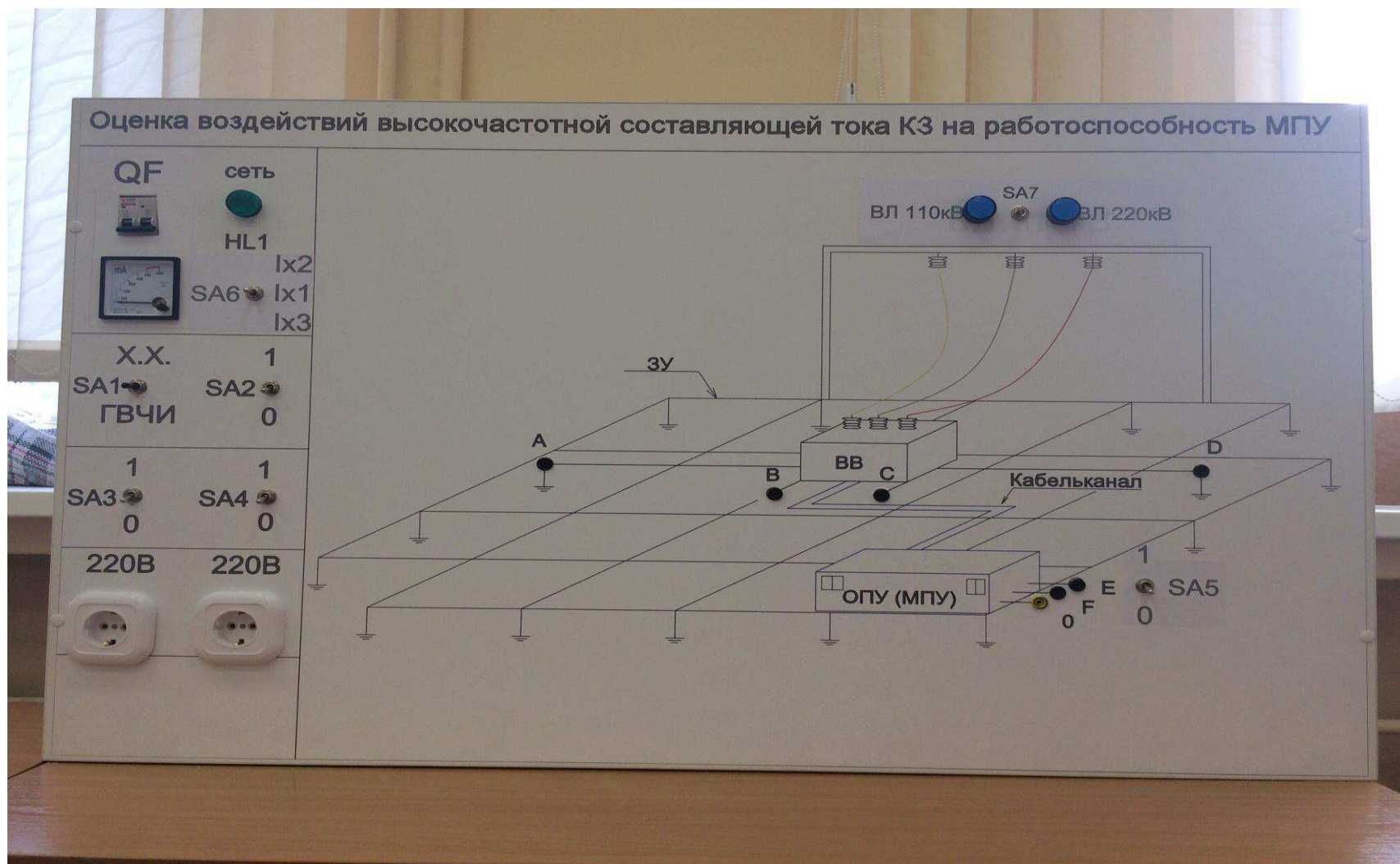


Рисунок 1.7 – Лицевая панель стенда «Оценка воздействий высокочастотной составляющей тока КЗ на работоспособность МПУ»

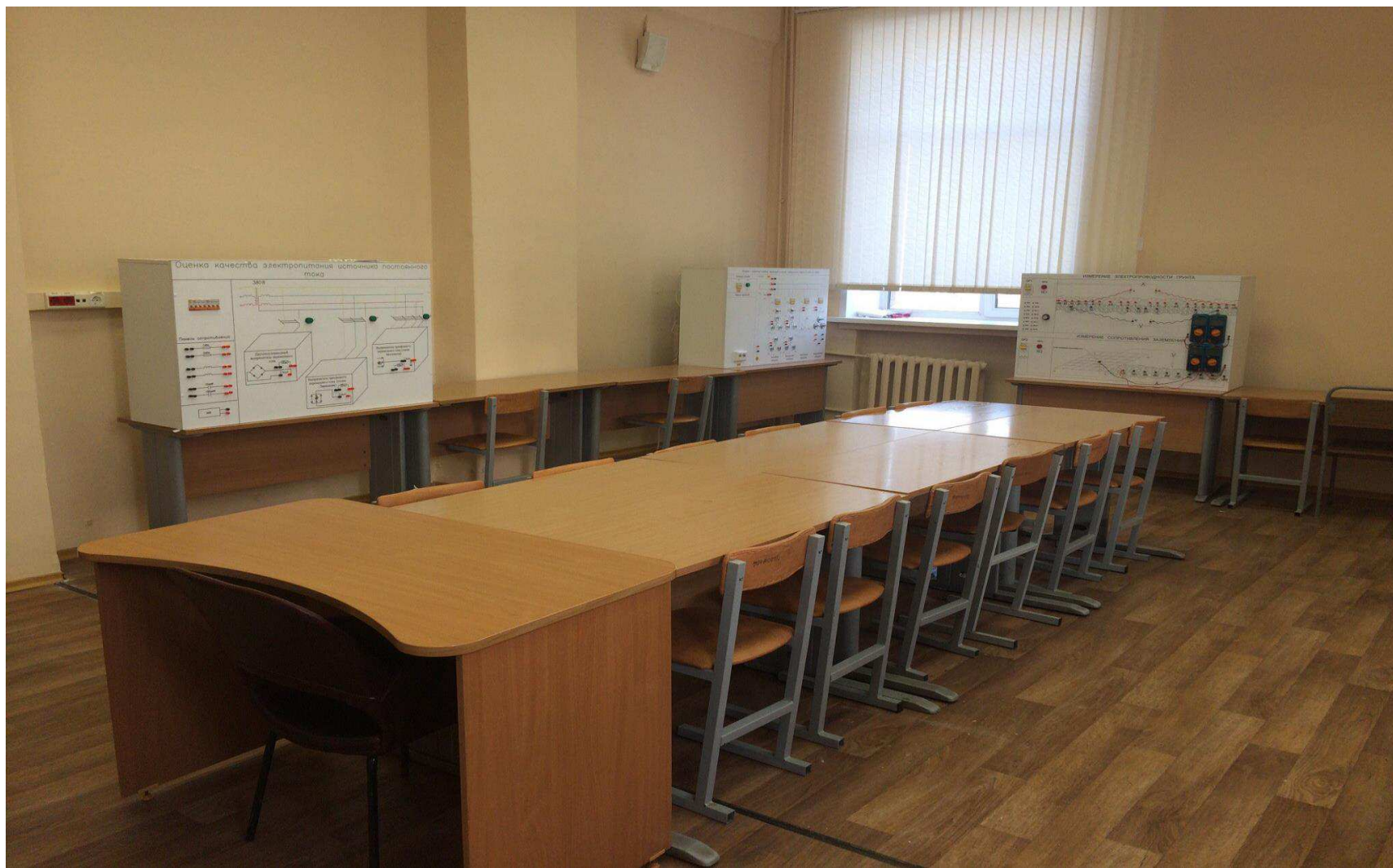


Рисунок 1.8 – Внешний вид лаборатории по изучению электромагнитной обстановки и электромагнитной совместимости на подстанциях.



Рисунок 1.9 - Внешний вид лаборатории по изучению электромагнитной обстановки и электромагнитной совместимости на подстанциях.

Стенд №2 «Оценка и измерение основных параметров качества электрической энергии в сетях до 1000В».

Данный стенд позволяет оценить основные параметры качества электрической энергии в сетях переменного тока до 1000В. К таким показателям относятся: отклонение напряжения, отклонение частоты, несимметрия напряжения, несинусоидальность напряжения и тока, спектральный состав напряжения и тока, фликер. Стенд позволяет измерять и анализировать показатели качества в сетях изолированной и глухозаземленной режимами нейтралей. С помощью стенда можно имитировать как линейную, так и не линейную нагрузку. В роли линейной нагрузки выступают лампы накаливания и конденсаторы. В качестве нелинейной нагрузки используются электродвигатели и светодиодное освещение. Кроме этого использование светодиодов позволяет установить влияние импульсной нагрузки на показатели качества электрической энергии. Наличие электроприемников, имеющих различные параметры, позволяет в комплексе оценить их влияние на показатели качества электроэнергии, например параллельная работа электродвигателей с системами освещения выполненными на лампах накаливания или светодиодных лампах, влияние конденсаторных установок на токи электродвигателя и т.д. Таким образом, данный стенд в достаточной мере отражает влияние нагрузки на показатели качества электроэнергии. Методическое обеспечение данного стенда включает 8 вариантов выполнения работы.

Стенд №3 «Измерение электропроводности грунта», «Измерение сопротивления заземления».

Данный стенд позволяет изучить методы по измерению электропроводности грунтов и заземляющих устройств подстанций и привить соответствующие навыки студентам. В основу измерения электропроводности грунтов положен метод вертикального электрического зондирования, так как данный метод нашел широкое применение на практике. Измерение сопротивления заземления ПС производится по методу амперметра –

вольтметра. Указанные методы измерений электропроводности грунтов и заземления рекомендованы СТО 56947007-29.130.15.105-2011. Кроме этого, полученные данные по электропроводности грунта на ПС позволяют определить сопротивление ЗУ расчетным путем и сравнить результаты с измеренными данными. Таким образом, работа на данном стенде позволит студентам получить навыки по использованию расчетных и инструментальных методов по определению сопротивления заземления, а также рассчитать напряжение на ЗУ в режиме КЗ. Методическое обеспечение данного стенда включает 10 вариантов выполнения работы.

Стенд №4 «Определение металlosвязи и напряжения прикосновения».

Данный стенд позволяет изучить метод амперметра-вольтметра при определении сопротивления металlosвязи и напряжения прикосновения.

Кроме этого данный стенд наглядно демонстрирует работу шины уравнивания потенциалов для снижения сопротивления металlosвязи и подсыпки из щебня в рабочих зонах на ПС для снижения напряжения прикосновения. Методическое обеспечение данного стенда включает 10 вариантов выполнения работы.

Стенд №5 «Оценка термической устойчивости экранов контрольных кабелей на основе имитации режима КЗ»

Данный стенд позволяет изучить влияние режимов КЗ на функционирование МПУ, связанных с надежностью контрольных кабелей. Одной из основных причин выхода из строя контрольного кабеля является протекание токов по экранам контрольного кабеля, которые способны привести к термическому разрушению кабеля. Стенд позволяет изучить метод имитации режима КЗ для оценки токов в экране контрольного кабеля в случае возникновения однофазного КЗ на подстанции. Кроме этого стенд демонстрирует эффективность использования ШУП для снижения токов в экранах контрольных кабелей. Методическое обеспечение данного стенда

включает 30 вариантов выполнения работы - 15 вариантов при имитации ПС110кВ и 15 вариантов при имитации ПС 220кВ.

Стенд №6 «Оценка воздействий высокочастотной составляющей тока КЗ на работоспособность МПУ»

Данный стенд изучает влияние переходных процессов в момент возникновения КЗ на ОРУ подстанций. Основным негативным фактором, влияющим на работоспособность МПУ в первый момент времени при возникновении КЗ, являются высокочастотные составляющие тока КЗ, которые через емкостные связи могут привести к термическому разрушению МПУ или к срыву их функционирования. Стенд позволяет изучить методы по определению импульсного сопротивления оборудования, синфазных и противофазных помех поступающих на вход МПУ и оценить опасность данных помех для функционирования МПУ. Методическое обеспечение данного стенда включает 6 вариантов выполнения работы - 3 варианта при имитации ПС110кВ и 3 варианта при имитации ПС 220кВ.

Таким образом, стенд №1 и стенд №2 позволяют приобрести навыки по изучению показателей качества источников постоянного и переменного тока. Стенд №3 и №4 позволяют получить теоретические знания и практические навыки, связанные с диагностикой заземляющих устройств. Стенд №5 и №6 дают практические навыки и знания студентам по оценке негативного влияния режимов КЗ на МПУ

На рисунке 1.10 приведен план расположения оборудования в лаборатории по курсу «Электромагнитная обстановка и электромагнитная совместимость на подстанциях».

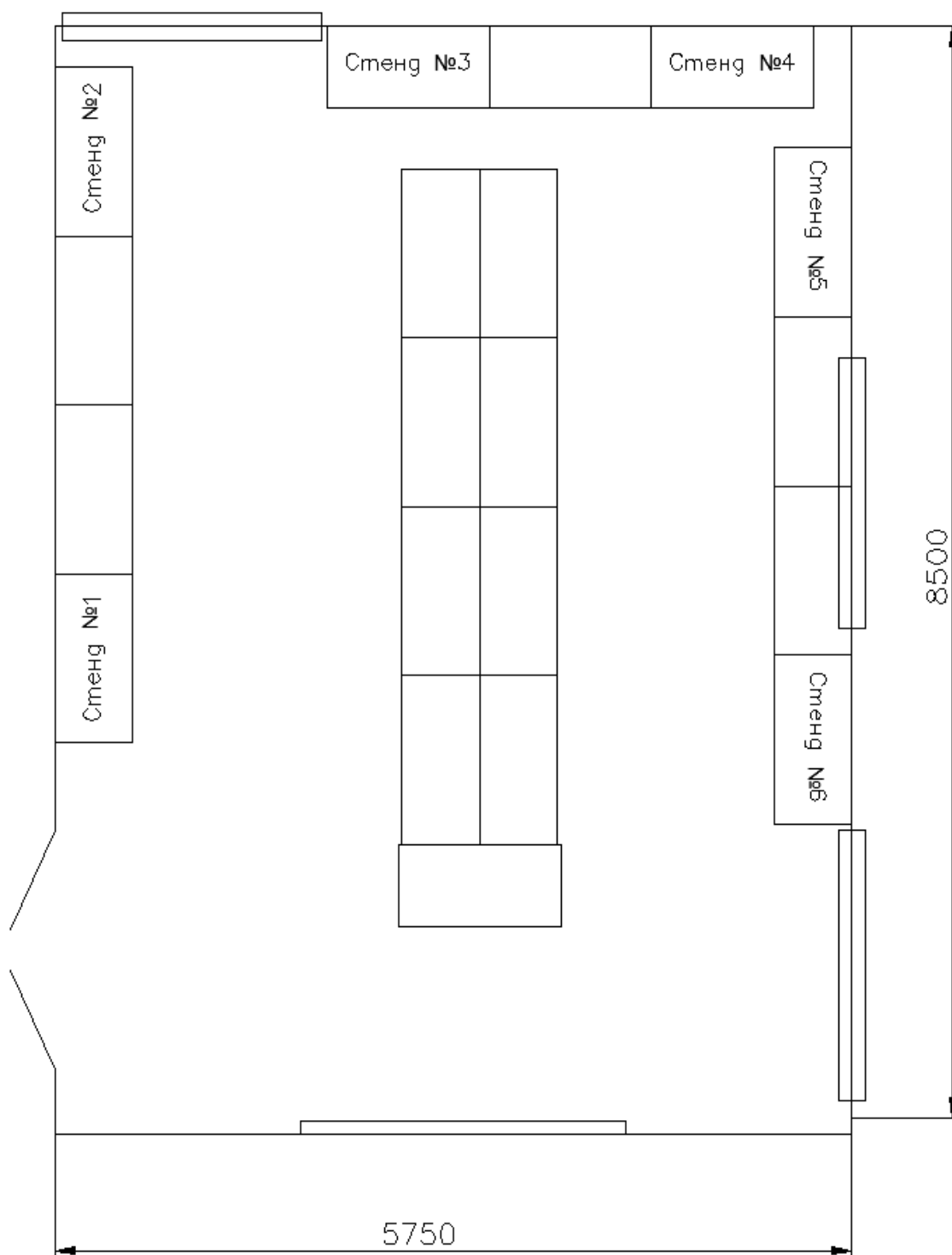


Рисунок 1.10 – План расположения оборудования в лаборатории

1.3 Схема электроснабжения и приборный парк лаборатории

Для питания стендов используется трехфазный переменный ток. Схема электроснабжения приведена на рисунке 1.11.

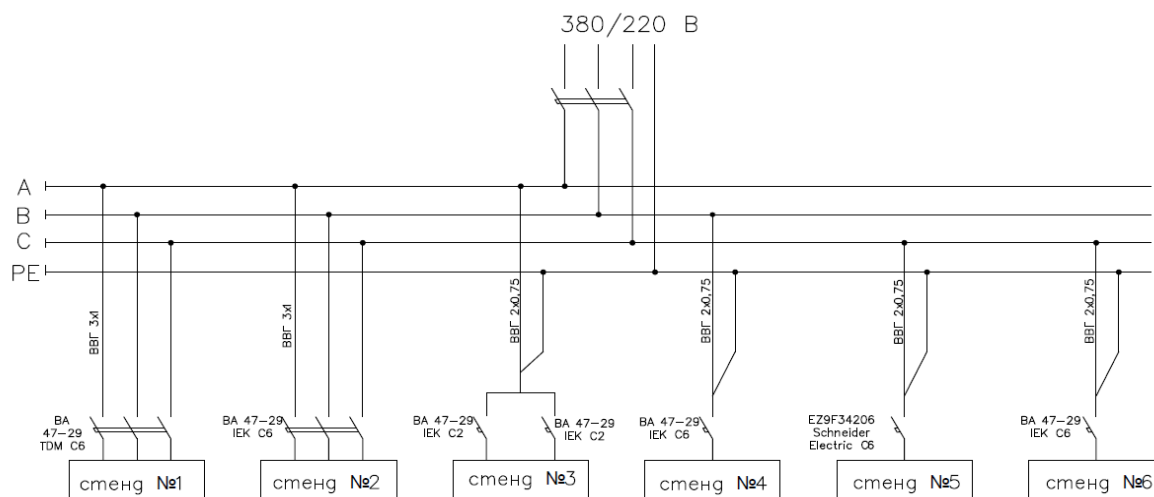


Рисунок 1.11 - Схема электроснабжения лаборатории

В качестве защитных аппаратов используются автоматические выключатели. Перечень применяемых вводных автоматических выключателей по стендам приведен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Перечень автоматических выключателей

Стенд	Марка и характеристики автоматического выключателя	Количество
«Оценка качества электропитания источника постоянного тока»	ВА 47-29 TDM C6 3р	1
Оценка и измерение основных параметров качества электрической энергии в сетях до 1000В»	ВА 47-29 IEK C6 3р	1
«Измерение электропроводности грунта», «Измерение сопротивления заземления»	ВА 47-29 IEK C2 2р	2
«Определение металlosвязи и напряжения прикосновения»	ВА 47-29 IEK C6 2р	1
«Оценка термической устойчивости экранов контрольных кабелей на основе имитации режима КЗ»	EZ9F34206 Schneider Electric C6 2р	1
«Оценка воздействий высокочастотной составляющей тока КЗ на работоспособность МПУ»	ВА 47-29 IEK C6 2р	1

Стенд № 1 получает питание от трехфазной сети переменного тока 380В. Питание на стенд поступает через трехполюсной автоматический выключатель ВА 47-29 TDM С6, который служит для защиты от перегрузок и КЗ. Подключение выполнено проводом марки ВВГ 3х1

Стенд №2 также запитывается от трехфазной сети переменного тока 380В. Питание на стенд поступает через трехполюсной автоматический выключатель ВА 47-29 IEK С6, который служит для защиты от перегрузок и КЗ. Подключение выполнено проводом марки ВВГ 3х1.

Стенд № 3 запитан фазным напряжением 220В трехфазной системы переменного тока. На данном стенде выполняются 2 лабораторные работы и на каждую работу установлен отдельный двухполюсной автоматический выключатель ВА 47-29 IEK С2. Подключение выполнено проводом марки ВВГ 2х0,75.

Стенд № 4 запитан фазным напряжением 220В трехфазной системы переменного тока. Питание на стенд подается через двухполюсной автоматический выключатель ВА 47-29 IEK С6, который служит для защиты от перегрузок и КЗ. Подключение выполнено проводом марки ВВГ 2х0,75.

Стенд № 5 запитан фазным напряжением 220В трехфазной системы переменного тока. Питание на стенд подается через двухполюсной автоматический выключатель EZ9F34206 Schneider Electric С6, который служит для защиты от перегрузок и КЗ. Подключение выполнено проводом марки ВВГ 2х0,75.

Стенд №6 запитан фазным напряжением 220В трехфазной системы переменного тока. Питание на стенд подается через двухполюсной автоматический выключатель ВА 47-29 IEK С6, который служит для защиты от перегрузок и КЗ. Подключение выполнено проводом марки ВВГ 2х0,75.

На стендах по изучению «Электромагнитной обстановки и электромагнитной совместимости» используются различные приборы. Приборный парк лаборатории представлен в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Приборный парк лаборатории

Наименование прибора	Марка (модель), характеристики	Количество
Амперметр переменного тока	CZ-96, 0....3А	1
Аналоговый амперметр переменного тока	CG -72, 0...500мА	1
Осциллограф	Fluke 196C	1
Мультиметр	Bort BMM-1000N	5
Мультиметр	Best DT-9205M	2
Мультиметр	Mastech MS8268	1
Двухканальный генератор сигналов прямого цифрового синтеза	MHS-5200P 25	1
Анализатор реистратор качества электрической энергии с функцией измерения фликера	REN-700	1

1.4 Вывод по разделу 1

На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие основные выводы:

1. Разработанные стенды позволяют оценить основные параметры электромагнитных обстановки и совместимости на подстанциях, соответствующие требованиям нормативных документов Федеральной сетевой компании единой энергетической службы (ФСК ЕЭС) России.

2. Использование современных измерительных приборов позволяет научить студентов их применению в реальных условиях эксплуатации оборудования на ПС.

2 Анализ методов измерения электропроводности грунта и методов оценки заземляющих устройств

2.1 Анализ методов измерения электропроводности грунта

2.1.1 Электрическое сопротивление земли

Земля является плохим проводником электрического тока: проводимость ее несколько миллиардов раз меньше проводимости металлов. Например, при средних значениях удельного сопротивления грунта (ρ)

$\rho = 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и меди $\rho_{\text{м}} = 175 \cdot 10^{-10} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (при 20°C) получим

$\frac{\rho}{\rho_{\text{м}}} = 5,7 \cdot 10^9$, т.е. сопротивление грунта в 5,7 млрд. раз больше сопротивления

меди. Однако поскольку площадь земли, через которую проходит ток обычно весьма велика, земля оказывает сравнительно небольшое сопротивление току.

Грунт представляет собой дисперсное пористое тело, состоящее из трех частей: твердой, жидкой и газообразной (рис. 2.1).



1 — твердая часть грунта; 2 — связанная вода; 3 — свободная вода; 4 — газообразная часть (воздух, пары, воды)

Рисунок 2.1 — Схематическая структура грунта

Твердая часть грунта – это мелкие частицы различных минералов, являющиеся продуктом разрушения и выветривания горных пород, а также перегноя – органической части почвы. Размеры этих частиц обычно находятся в пределах от сотых долей микрон до 1 мм.

Жидкая часть грунта, так называемый почвенный раствор, - это вода и растворенные в ней вещества, которые содержатся также в твердой и газообразной частях грунта. Воду условно можно разделить на две формы: связанную и свободную.

Связанная вода – тонкая водяная пленка, окружающая твердые частицы грунта и удерживаемая ими с большой силой. Эти явления объясняются наличием на поверхности почвенных частиц электрически не насыщенных активных центров, которые обуславливают притяжение к их поверхности молекул воды и ионов, растворенных в ней солей.

Газообразная часть грунта – воздух и водяной пар, заполняющие незанятые водой пространства в грунте, а также содержащиеся в свободной воде в виде местных включений.

Электрическое сопротивление грунта характеризуется его объёмным удельным сопротивлением куба грунта с ребром длиной 1 м или 1 см.

Единицей удельного сопротивления является соответственно ом на метр или ом на сантиметр ($1 \text{ Ом} \cdot \text{м} = 100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$).

Значение ρ земли колеблется в широких пределах – от десятков до тысяч ом на метр, так как оно зависит от многих факторов, в том числе от влажности, температуры, рода грунта, степени его уплотнения, а также от времени года.

2.1.2 Зависимость ρ грунта от влажности

Грунты любого рода – песок, глина, чернозем в – абсолютно сухом состоянии обладают большим удельным сопротивлением (свыше $10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), т. е. практически не проводят ток. Это справедливо для грунтов как с малым,

так и с большим содержанием растворимых веществ, ибо, как известно, сухие соли, безводные кислоты и основания в твердом виде тока не проводят.

Если же грунт увлажнить, то сопротивление его уменьшится в десятки, даже сотни раз благодаря растворению в воде солей, кислот и оснований, содержащихся в грунте, а также за счет проводимости самой воды.

Из сказанного следует, что основной проводник тока в грунте – это его жидкая часть, т.е. почвенный раствор.

Как всякая проводящая жидкость, почвенный раствор является электролитом и обладает ионной проводимостью, т.е. заряды в нем переносятся не электронами, как это имеет место в металлических проводниках, а ионами, образовавшимися в результате электрической диссоциации (распада) молекул солей кислот и оснований при растворении их в воде.

Под влиянием электрического поля в растворе возникает направленное перемещение ионов к электродам, что и обуславливает проводимость грунта. При этом чем больше переносится ионов в единицу времени через единицу площади (при данных напряженности поля и температуре раствора), тем больше ток, т.е. тем выше проводимость грунта. Отсюда можно сделать вывод: чем больше в грунте содержится воды и растворимых веществ, тем меньше его удельное сопротивление. Однако эта закономерность справедлива лишь в определенных пределах.

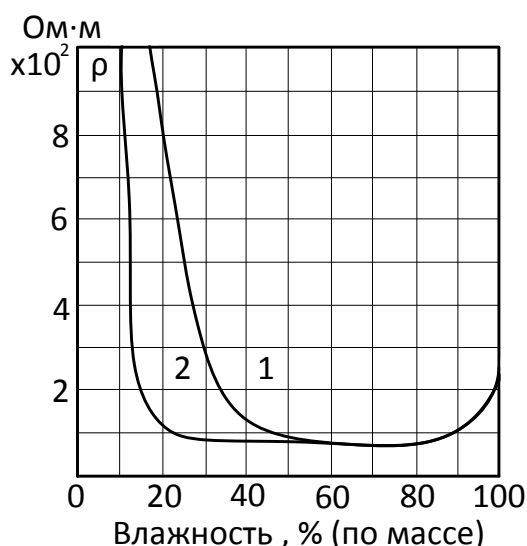
Так, при высокой концентрации ионов в почвенном растворе, что соответствует большому содержанию растворимых веществ в грунте или малой его влажности, расстояние между ионами оказываются небольшими. Это приводит к возрастанию сил междуионного притяжения, снижению скорости перемещения ионов из-за тормозящего действия этих сил, а в результате – к росту удельного сопротивления грунта.

При низкой концентрации ионов, что соответствует малому содержанию растворимых веществ в грунте или большой его влажности, тормозящая роль между ионных связей практически отсутствует и ионы перемещаются с большей скоростью. Тем не менее число ионов, проходящих через единицу площади за

некоторый отрезок времени, может быть очень небольшим, что также свидетельствует о возрастании ρ грунта.

Таким образом, для грунтов существуют некоторые оптимальные значения влажности и содержания растворимых веществ, при которых ρ достигает минимума.

В практических условиях резкое снижение ρ грунта наблюдается обычно при увеличении влажности до 15—20% (по массе). Дальнейшее увлажнение мало влияет на его сопротивление. При влажности более 70—80% ρ грунта может возрасти за счет снижения концентрации растворимых в воде веществ (рис. 2.2).



1 – тонкодисперсный грунт; 2 – грубодисперсный грунт

Рисунок 2.2 – Изменение удельного сопротивления грунта в зависимости от содержания в нем влаги

Соотношение между количествами связанной и свободной воды в грунте также влияет на его удельное сопротивление. Дело в том, что для перемещения ионов, содержащихся в связанной воде, требуется значительно больше энергии, поскольку в этом случае необходимо преодолеть усилия, удерживающие ионы около твердых частиц грунта. Иначе говоря, связанная вода обладает большим

удельным сопротивлением, чем свободная, и изменение соотношения между количествами связанной и свободной воды в грунте будет влиять на его удельное сопротивление.

Так, например, при 100%-ном влагонасыщении грунта, т. е. при заполнении всех пор грунта водой, он будет иметь наибольшее количество воды обоих видов и будет обладать некоторым ρ . При уменьшении влагонасыщения грунта, например, до 50%, в нем почти полностью сохраняется связанная вода, имеющая более прочные связи, а содержание свободной воды снизится больше чем на половину. Вследствие этого ρ возрастет, однако незначительно, так как в почве еще будет существовать непрерывная цепочка из хорошо проводящей воды.

Дальнейшее понижение влажности будет сопровождаться возрастанием доли связанной воды и более интенсивным ростом ρ и, наконец, приведет к тому, что в грунте останется лишь связанная вода в виде тонкого слоя вокруг твердых частичек грунта, которая также образует непрерывные электропроводящие цепочки, но с очень большим сопротивлением. Если еще уменьшить влажность, то возникнут обрывы этих цепочек, что вызовет резкое, скачкообразное возрастание ρ .

2.1.3 Зависимость ρ грунта от температуры

Температура грунта изменяется в зависимости от многих причин и оказывает существенное влияние на его удельное сопротивление.

Грунт, содержащий влагу, является электролитом и поэтому обладает отрицательным температурным коэффициентом сопротивления: с ростом температуры его удельное сопротивление уменьшается. Объясняется это тем, что с повышением температуры увеличивается степень диссоциации молекул веществ, растворенных в воде, т. е. возрастает концентрация ионов в растворе, что ведет обычно к снижению удельного сопротивления. Однако эта

закономерность сохраняется до тех пор, пока влага не начнет испаряться, что сопровождается резким увеличением сопротивления.

Бурное испарение влаги и как следствие этого стремительный рост сопротивления грунта происходят при температуре 100°C и выше. Такой нагрев может быть результатом прохождения через заземлитель больших токов. Высушивание грунта происходит и под воздействием температуры окружающего воздуха, т. е. при температуре почвы, значительно меньшей 100°C . Правда, в этом случае влаги лишается верхний слой почвы толщиной обычно не больше 50—60 см. Поэтому при устройстве заземлений в целях экономии металла заземлители размещают в земле ниже этого уровня.

При 0°C , т. е. при замерзании влаги в грунте, его удельное сопротивление возрастает скачкообразно в несколько раз, поскольку сопротивление льда, как правило, выше сопротивления воды. Причем с увеличением содержания солей в воде возрастает разница между значениями сопротивлений воды и льда. Лишь при отсутствии солей вода (например, дистиллированная) и ее лед обладают практически одинаковым сопротивлением около 10^6 — 10^7 Ом·м (чистый лед обладает ионной проводимостью за счет присутствия в его решетке ионов H^+ и OH^- , которая при -10°C составляет $1,4 \cdot 10^{-7}$ См/м.).

Таким образом, образовавшийся в грунте лед в виде линз и тонких прослоек не только не участвует в проведении тока, но и препятствует его прохождению по грунту, уменьшая проводящее сечение грунта и удлиняя путь тока.

При дальнейшем понижении температуры грунта (ниже 0°C) рост удельного сопротивления продолжается, но менее интенсивно, чем при 0°C (рис. 2.3).

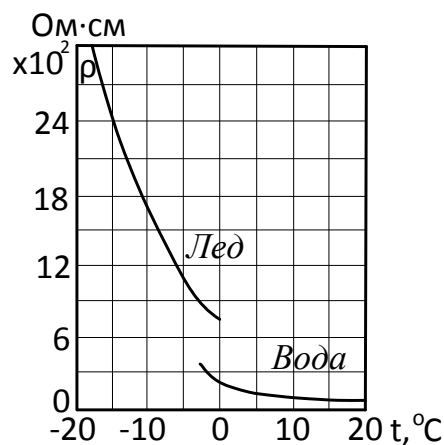
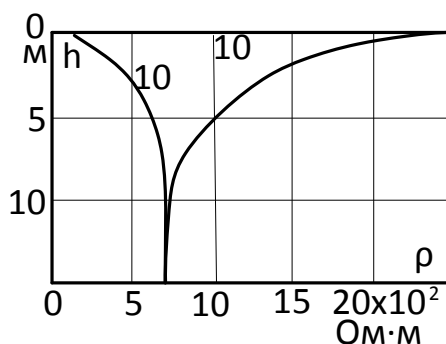


Рисунок 2.3 – Зависимость удельного сопротивления грунта (суглинок грунта с влажностью 15% по массе) от температуры

В районах вечной мерзлоты, которые занимают около 25% суши земного шара, слой вечномерзлого грунта, простираясь в глубину на десятки и сотни метров, обладает очень большим удельным сопротивлением, которое практически никогда не изменяется. Лишь у верхнего слоя земли толщиной от 0,5 до 4,5 м ρ снижается в летнее время в несколько раз, достигая обычных значений. Однако зимой, когда температура этого слоя опускается ниже температуры глубинных слоев, его ρ оказывается в несколько раз больше удельного сопротивления этих слоев (рис. 2.4). Поэтому в районах вечной мерзлоты очень трудно создать качественное заземление, т. е. обладающее малым сопротивлением.



1 – летом при оттаявшем верхнем слое грунта; 2 – зимой

Рисунок 2.4 – Удельное сопротивление грунта (глина) в районе вечной мерзлоты на разных глубинах

2.1.4 Влияние рода грунта на его удельное сопротивление

Существует много родов грунта — глина, суглинок, песок, супесок, чернозем, садовая земля, торф, лёсс и др., сильно различающихся физической структурой и химическими свойствами.

Род грунта непосредственно не оказывает влияния на его удельное сопротивление, поскольку сухой грунт любого рода тока практически не проводит. Однако различные грунты содержат неодинаковое количество растворимых веществ, обладают различной дисперсностью, имеют различную способность удерживать свободную воду и поэтому, будучи увлажненными, оказывают различное сопротивление электрическому току (табл.2.1).

Содержание в грунте растворимых веществ — солей, кислот, оснований — оказывает прямое влияние на его сопротивление: чем больше таких веществ, тем ниже ρ .

Дисперсность — степень измельченности твердых частичек грунта — обуславливает соотношение между количествами свободной и связанной воды, содержащейся в нем: в тонкодисперсных грунтах, обладающих большей поверхностью, связанной воды больше, чем в грубодисперсных, при тех же условиях. Следовательно, при невысокой влажности грунта (менее 50—60%), когда значительно повышается доля связанной воды, удельное сопротивление тонкодисперсного грунта будет значительно выше (см. рис.2.1).

Способность грунта удерживать свободную воду является весьма ценной, поскольку ρ обычно понижается с увеличением влажности грунта. В практике при одних и тех же погодных условиях разные грунты могут содержать различное количество воды. Например, песок очень быстро лишается влаги, в то время как глина удерживает ее долго.

Для примера приведем краткие характеристики некоторых грунтов — глины, песка и чернозема.

Глина — горная обломочная порода, состоящая из плотных и очень мелких (размером 0,005 мм) частиц, образующих с водой пластическую массу, хорошо

задерживающую влагу; богата солями, кислотами и основаниями, обладает весьма малой пористостью, содержит много связанной воды, при обычной влажности имеет относительно низкое ρ ; является хорошим грунтом для устройства заземлений.

Песок – рыхлая смесь зерен горных пород размером от 0,15 до 5 мм, образовавшихся главным образом вследствие разрушения этих пород. Содержит преимущественно кварц, а также глинозем, известь и окись железа. Обладает большой плотностью, малым содержанием связанной воды и растворимых веществ, плохо удерживает влагу. При обычной влажности обладает высоким ρ и является плохим грунтом для устройства заземлений.

Чернозем – рыхлая почва с большим содержанием перегноя (гумуса), представляющего собой совокупность продуктов микробиологической деятельности, в том числе продуктов разложения растительных остатков. Богат растворимыми веществами. Нередко обладает высокой степенью дисперсности, поэтому содержит большое количество связанной воды. Пористость его колеблется в широких пределах, он хорошо удерживает воду и часто имеет удельное сопротивление, близкое к ρ глины. Является хорошим грунтом для устройства заземлений.

Приближенные значения удельных сопротивлений некоторых грунтов и воды приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 Приближенные значения удельных электрических сопротивлений различных грунтов и воды

Грунт, вода	Удельное сопротивление, Ом·м		Грунт, вода	Удельное сопротивление, Ом·м	
	возможные пределы колебаний	при влажности 10-20% к массе грунта		возможные пределы колебаний	при влажности 10-20% к массе грунта
1	2	3	4	5	6

Окончание таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6
Глина	8-70	40	Каменистый	500-800	-
Суглинок	40-150	100	Скалистый	10^4 - 10^7	-
Песок	400-700	700	Вода морская	0,2-1	-
Супесок	150-400	300	Вода речная	10-100	-
Торф	10-30	20	Вода прудовая	40-50	-
Чернозем	9-53	20	Вода грунтовая	20-70	-
Садовая земля	30-60	40	Вода в ручьях	10-60	-

2.1.5 Зависимость ρ грунта от его уплотненности

Степень уплотненности грунта (плотность взаимного прилегания частиц) оказывает непосредственное влияние на его удельное сопротивление: чем выше плотность, т.е. чем лучше утрамбован грунт, тем меньше его удельное сопротивление. Объясняется это тем, что с уплотнением грунта исчезают свободные пространства между его частицами, благодаря чему увеличивается токопроводящее сечение и повышается способность удерживать влагу, а, следовательно, повышается проводимость грунта. Так, например, при повышении давления на грунт с 2 до 20 кПа (с 0,2 до 2 тс/м²), что в какой-то мере характеризует возрастание его плотности, удельное сопротивление грунта снижается на 10—40% (в зависимости от его состава и влажности).

В связи с этим при устройстве заземлений необходимо тщательно трамбовать грунт, что в конечном итоге дает реальную экономию металла. Хорошо поддаются трамбовке чернозем, хотя при разработке он разрыхляется до 45%, а также глина, разрыхляющаяся на 10-30%; плохо трамбуется песок, у которого способность к разрыхлению составляет всего лишь 5—15%.

2.1.6 Зависимость ρ грунта от времени года

Время года влияет на удельное сопротивление грунта, поскольку атмосферные условия, изменяющиеся в течение года, изменяют содержание влаги в грунте, его температуру и количество растворенных в нем солей.

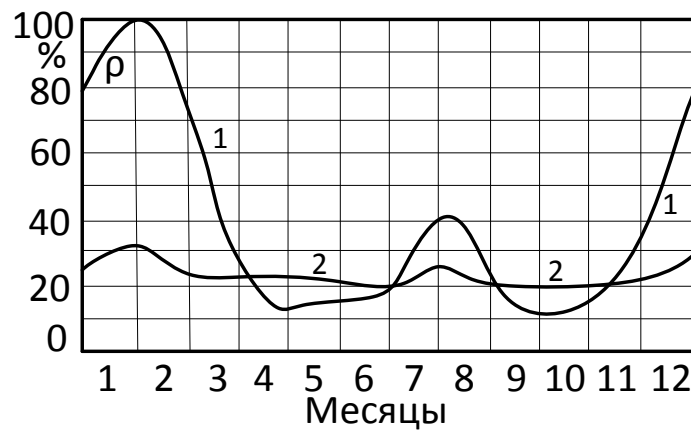
Степень и характер изменений ρ в течение года зависят от многих факторов — рода грунта, климатических условий местности, погодных условий данного года и т. п. Поэтому заранее определить, как будет изменяться ρ в течение года в интересующем нас месте, строго говоря, невозможно. Однако опытом установлен ряд простых закономерностей, которые с достаточной для практики точностью позволяют оценить ожидаемое изменение ρ . Так, снижение удельного сопротивления происходит, как правило, в весенние и осенние месяцы года, когда дожди и тающий снег резко увеличивают содержание влаги в почве. Благоприятное влияние оказывает весной и повышение температуры почвы.

Увеличение ρ происходит зимой и летом вследствие замерзания и испарения влаги, причем более высокие значения ρ наблюдаются зимой (рис.2.5).

Наибольшему влиянию подвержены верхние слои грунта, которые зимой промерзают, весной и осенью раньше и обильнее других слоев насыщаются влагой, а летом раньше прогреваются и высыхают. В верхних слоях может иметь место вымывание растворимых веществ и, наоборот, увеличение содержания их за счет веществ, принесенных водой.

Более глубокие слои земли обладают более стабильным удельным сопротивлением. Поэтому заземлители, глубоко закопанные в землю, в том числе вертикальные стержневые, выполняют свою задачу лучше, чем полосовые заземлители, прокладываемые вблизи поверхности земли.

Кривые на (рис. 2.5) показывают примерный характер изменений ρ в течение года на разных глубинах.



1 – на глубине 0,7 м; 2 – на глубине 2,5 м

Рисунок 2.5 – Изменение удельного сопротивления грунта в течение года.

При проектировании заземляющих устройств необходимо в качестве расчетного брать наибольшее возможное в течение года значение ρ , т. е. ориентироваться на худший случай.

Однако измерение ρ в самое неблагоприятное время и при наиболее неблагоприятной погоде встречает в практике серьезные затруднения. Поэтому эти измерения производятся, как правило, в теплое время года (май— октябрь) и измеренное удельное сопротивление $\rho_{\text{изм}}$ умножается на коэффициент сезонности ψ , учитывающий возможное повышение сопротивления в течение года и состояние (увлажненность) земли во время измерений.

В итоге получается расчетное значение удельного сопротивления для однородной земли, Ом·м,

$$\rho_{\text{расч}} = \rho_{\text{изм}} \cdot \psi, \quad (2.1)$$

Если измерения проводились для многослойной земли, т. е. получены измеренные значения удельных сопротивлений $\rho_{\text{изм}}$ нескольких слоев, то на коэффициент сезонности умножаются значения $\rho_{\text{изм}}$ лишь тех слоев, которые лежат в пределах толщины слоя сезонных изменений.

Коэффициенты сезонности ψ в значительной степени зависят от характеристики климатических зон, в которых сооружаются заземлители. Признаки климатических зон указаны в табл. 2.2.

Таблица 2.2 Признаки климатических зон для определения коэффициентов сезонности ψ

Характеристика климатической зоны	Климатические зоны России			
	I	II	III	IV
Средняя многолетняя низшая температура (январь), °С	От –20 до –15	От –14 до –10	От – 10 до 0	От 0 до +5
Средняя многолетняя высшая температура (июль), °С	От +16 до +18	От +18 до +22	От +22 до +24	От +24 до +26
Среднегодовое количество осадков, см	40	50	50	30-50
Продолжительность заморозания вод, дни	190-170	150	100	0

Значения ψ берутся из таблиц: для однородной земли — из табл. 2.3; для слоя сезонных изменений многослойной земли — из табл. 2.4.

Таблица 2.3 Коэффициенты сезонности ψ для однородной земли

Климатическая зона по табл. 2.2	Состояние земли во время измерений ее сопротивления		
	Повышенной влажности	Нормальной влажности	Малой влажности
1	2	3	4
Вертикальный электрод длиной 3 м			
I	1,9	1,7	1,5
II	1,7	1,5	1,3
III	1,3	1,3	1,2
IV	1,3	1,1	1,0
Вертикальный электрод длиной 5 м			
I	1,5	1,4	1,3
II	1,4	1,3	1,2
III	1,3	1,2	1,1

Окончание таблицы 2.3

1	2	3	4
IV	1,2	1,1	1,0
Горизонтальный электрод длиной 10 м			
I	9,3	5,5	4,1
II	5,9	3,5	2,6
III	4,2	2,5	2,0
IV	2,5	1,5	1,1
Горизонтальный электрод длиной 50 м			
I	7,2	4,5	3,6
II	4,8	3,0	2,4
III	3,2	2,0	1,6
IV	2,2	1,4	1,12

Примечания:

1. Земля считается повышенной влажности, если измерению ее сопротивления предшествовало выпадение большого количества (свыше нормы) осадков (дождей); нормальной (средней) влажности — если измерению предшествовало выпадение небольшого количества (близкое к норме) осадков; малой влажности — если земля сухая, количество осадков в предшествующий измерению период ниже нормы.

2. Заглубление электродов, т. е. расстояние от поверхности земли до верхнего конца вертикального электрода и до горизонтального электрода, равно 0,7-0,8 м.

Таблица 2.4 Коэффициенты сезонности ψ для слоя сезонных измерений в многослойной земле

Климатическая зона по табл. 2.2	Условная толщина слоя изменений, м	Состояний (увлажненность) земли во время измерений ее сопротивления		
		повышенной влажности	нормальной влажности	малой влажности
1	2	3	4	5
I	2,2	7,0	4,0	2,7
II	2,0	5,0	2,7	1,9
III	1,8	4,0	2,0	1,5
IV	1,6	2,5	1,4	1,1

Примечание. Уточнение определений состояния (увлажненности) земли во время измерений ее сопротивления дано в примечании 1 к табл. 2.3.

2.1.7 Методы измерения удельного сопротивления грунта

При проектировании и эксплуатации заземляющего устройства необходимо знать ρ грунта. Пользоваться для этой цели данными таблиц, например табл.2.1, нельзя, так как в них приводятся ориентировочные значения ρ , которые могут отличаться от истинных в десятки и сотни раз.

В настоящее время для оценки электропроводности используют следующие методы:

- 1) Метод разового зондирования или метод простого пробного зондирования
- 2) Метод послойного зондирования или метод погруженного пробного зондирования
- 3) Метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ)

2.1.7.1 Методом разового зондирования

Удельное сопротивление грунта определяется методом разового зондирования с помощью контрольного зонда в два этапа. Вначале контрольный зонд — стержневой электрод в виде сплошного стержня или трубы диаметром $d=4\div 5$ см с острым наконечником — погружается в землю вертикально до глубины l , м предполагаемого заложения заземлителей так, чтобы верхний его конец возвышался над землей, и замеряется его сопротивление растеканию $R_{\text{изм}}$, Ом.

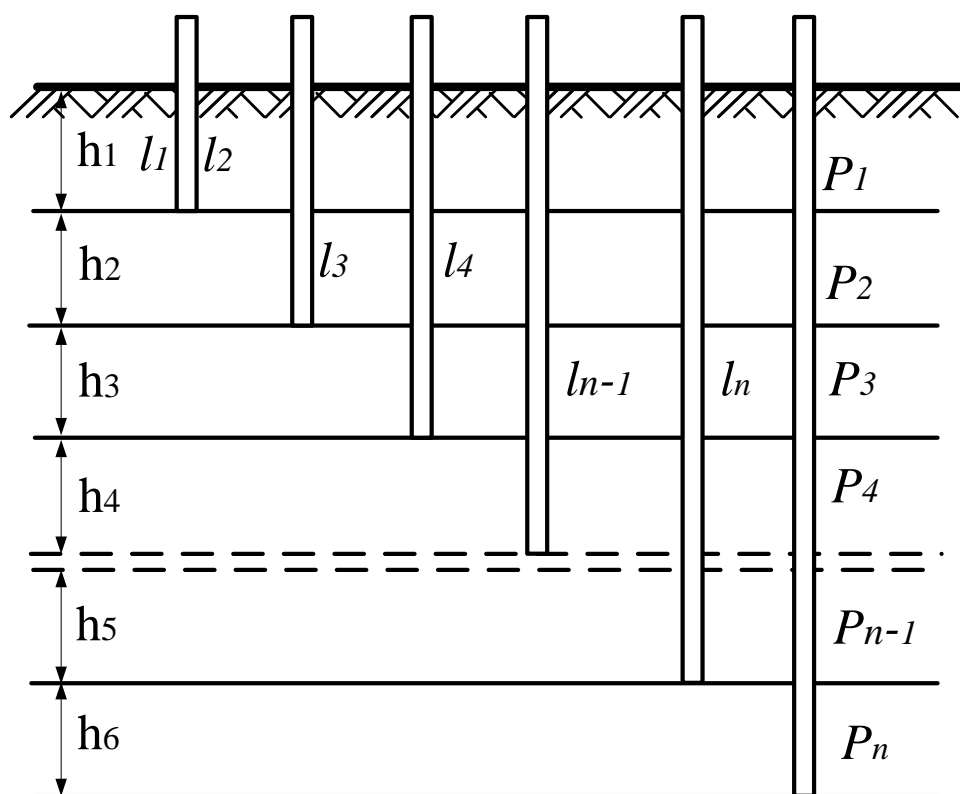
Затем определяется искомое среднее измеренное удельное сопротивление земли, Ом·м по формуле для расчета стержневого заземлителя:

$$\rho_{\text{изм}} = R_{\text{изм}} \cdot \frac{2\pi l}{\ln\left(\frac{4l}{d}\right)}. \quad (2.2)$$

Для большей точности измерений контрольный зонд погружают в землю не менее чем в трех – четырех местах исследуемой площадки и в качестве $R_{\text{изм}}$ применяют их среднее значение.

2.1.7.2 Метод послойного зондирования

Методом послойного (или ступенчатого) зондирования выполняют с помощью контрольного зонда, погружаемого в землю не сразу на всю длину, а в несколько приемов участками (ступенями) длиной $h_n = 0,5 \div 1,5$ (рис. 2.6). Каждая такая ступень представляет собой как бы отдельный слой земли, подлежащий измерению.



l — глубина погружения зонда; ρ — удельное сопротивление данного слоя земли; h — толщина (мощность) слоя земли

Рисунок 2.6 – Схема измерений удельного сопротивления земли методом послойно (ступенчатого) зондирования

После очередного погружения измеряется сопротивление растеканию зонда R_n , при данной глубине его погружения l_n , м. Затем для каждого значения R_n по формуле (2.3) вычисляется среднее удельное сопротивление земли, соответствующее данной глубине погружения зонда, Ом·м.

$$\rho_{n,\text{изм}} = R_n \cdot \frac{2\pi l_n}{\ln\left(\frac{4l_n}{d}\right)}, \quad (2.3)$$

где d — диаметр зонда, м.

После этого вычисляются значения удельных сопротивлений каждого слоя (ступени) земли, Ом·м, по выражению

$$\rho_{n,\text{расч}} = \frac{h_n}{\frac{l_n}{\rho_{n,\text{изм}}} - \frac{l_{n-1}}{\rho_{(n-1)\text{изм}}}}. \quad (2.4)$$

Зная климатическую зону местности, в которой производились измерения, и состояние земли в это время, находим по табл. 2.4 толщину слоя сезонных изменений h_c и коэффициент сезонности ψ , на который умножаем вычисленные по (2.3) $\rho_{h,\text{изм}}$ тех слоев грунта, которые находятся в пределах h_c .

В итоге получаем расчетные значения удельных сопротивлений верхних (ступеней) слоев грунта:

$$\rho_{h,\text{расч}} = \rho_{h,\text{изм}} \cdot \psi, \quad (2.5)$$

где ψ — сезонный коэффициент.

Все остальные ступени (слои), лежащие ниже h_c , считаются не подверженными сезонным изменениям, поэтому их расчетные удельные сопротивления принимаются равными измеренным, т.е.

$$\rho_{h, \text{расч}} = \rho_{h, \text{изм}}. \quad (2.6)$$

Приведение многослойной земли к двухслойной производится путем отнесения к верхнему слою тех слоев (ступеней), у которых удельные сопротивления имеют большие значения, а к нижнему слою — малые значения. При этом удельные сопротивления соответственно верхнего и нижнего слоев двухслойной земли Ом·м определяются следующими выражениями:

$$\rho_{1 \text{ расч}} = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_k}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_k}{\rho_k}} \quad (2.7)$$

$$\rho_{2 \text{ расч}} = \frac{h_{k+1} + h_{k+2} + \dots + h_n}{\frac{h_{k+1}}{\rho_{k+1}} + \frac{h_{k+2}}{\rho_{k+2}} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n}} \quad (2.8)$$

Здесь индексы от 1 до k означают номера измеренных слоев (ступеней), вошедших в верхний, а от (k+1) до n — вошедших в нижний слой; $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_k, \rho_{k+1}, \dots, \rho_n$ — четные значения удельных сопротивлений соответствующих ступеней земли (т.е. $\rho_{h, \text{изм}}$)

Методы измерения сопротивления растеканию контрольного зонда различны. Наиболее широкое распространение получил простой метод амперметра - вольтметра. Сущность его заключается в том, что с помощью амперметра измеряется ток I_x , проходящий через контрольный зонд (вертикальный электрод) в землю, а с помощью вольтметра - потенциал

этого зонда φ_x . В результате получим искомое сопротивление растеканию контрольного зонда, Ом,

$$R_{\text{изм}} = \frac{\varphi_x}{I_x} \quad (2.9)$$

На (рис. 2.7, а) приведена схема измерений $R_{\text{изм}}$ указанным методом, из которой видно, что кроме контрольного зонда Х требуется ещё два вспомогательных электрода: токовый электрод Т, предназначенная для создания цепи тока I_x , и потенциальная электрод П, служащий для подключения одного из проводов вольтметров к точке земли с нулевым потенциалом методом.

Эта ты же схема может быть использована для измерения сопротивления группового заземлителя. При этом расстояние между заземлителем электродами должно быть не меньше указанных на (рис 2.7, б).

В качестве источника тока применяются однофазный понижающий трансформатор, например, сварочный. Питание непосредственно от сети недопустимо, так как всякая связь сети с землей (заземленная нейтрал, плохая изоляция и т. п.) существенно искажает результаты измерений.

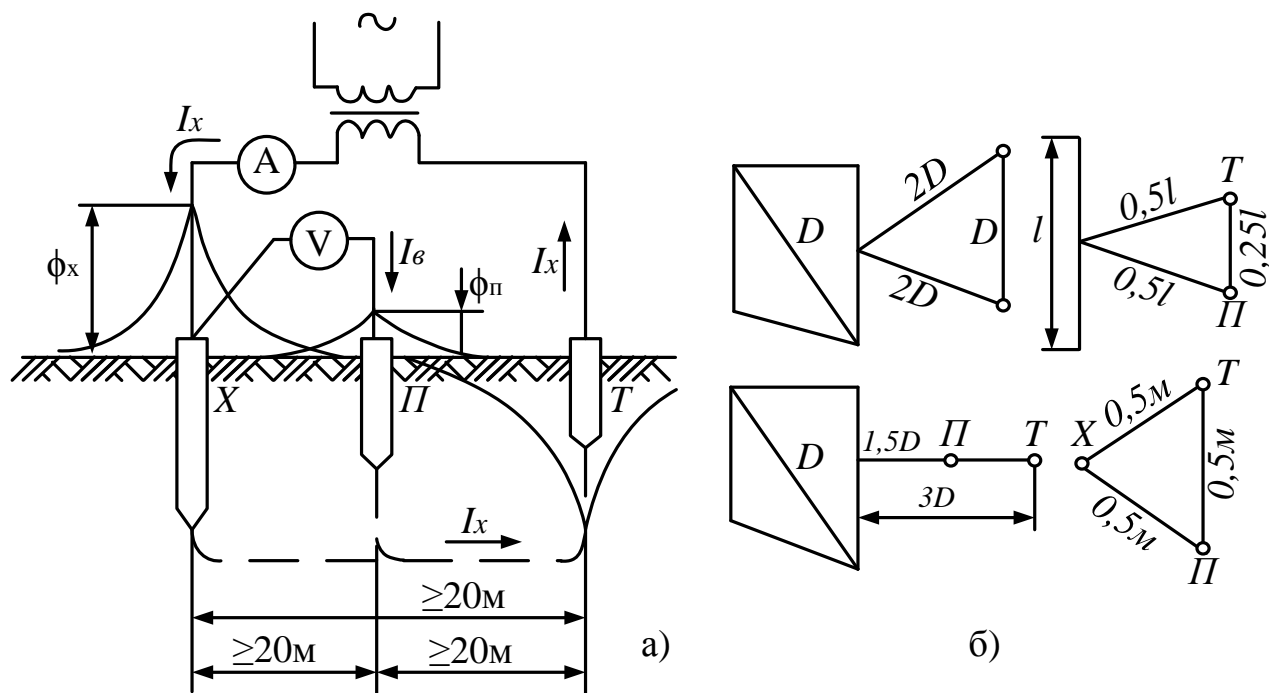
Строго говоря, вольтметр показывает не весь потенциал контрольного зонда φ_x , а лишь большую его часть. В самом деле, схема, приведенной на (рис. 2.7, а), видно, что показание вольтметра, В,

$$U = \varphi_x - \varphi_{\text{П}} = \varphi_x - I_{\text{В}} R_{\text{П}}, \quad (2.10)$$

где $\varphi_{\text{П}}$ - потенциал вспомогательного (потенциального) электрода, В;

$I_{\text{В}}$ - ток вольтметра, А;

$R_{\text{П}}$ — сопротивление растеканию потенциального электрода, Ом.



а – схема измерения; б – рекомендуемое взаимное расположение электродов (зондов) и минимальные расстояния между ними и испытуемым заземлителем

Рисунок 2.7 – Измерение сопротивления растеканию контрольного зонда(электрода) X и заземлителей различной конфигурации методом амперметра – вольтметра

Для повышения точности измерений необходимо предельно снизить $\varphi_{\text{п}}$, что достигается уменьшением $R_{\text{п}}$ и применения в вольтметре сопротивлением $R_{\text{в}}$, значительно большим, чем $R_{\text{п}}$.

Ошибка измерений γ , %, определяется из уравнения

$$\gamma = \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{в}} + R_{\text{п}}} \cdot 100 \quad (2.11)$$

Из этого уравнения видно, что для того чтобы γ не превышала 2%, $R_{\text{в}}$ должно в 50 раз превышать $R_{\text{п}}$

Уравнение (2.12) получено следующим путем.

Имея в виду, что $\varphi_{\text{п}} = I_{\text{в}} R_{\text{п}}$, а ток вольтметра $I_{\text{в}} = (\varphi_{\text{x}} - \varphi_{\text{п}})/R_{\text{в}}$ (рис. 3.41, а), получим $\varphi_{\text{п}}(R_{\text{в}} + R_{\text{п}}) = \varphi_{\text{x}} R_{\text{п}}$, откуда $\frac{\varphi_{\text{п}}}{\varphi_{\text{x}}} = R_{\text{п}}/(R_{\text{в}} + R_{\text{п}})$,

тогда γ , %, будет,

$$\gamma = \frac{R_{\Pi}}{R_{\text{в}} + R_{\Pi}} \cdot 100 \quad (2.12)$$

Сопротивление растеканию контрольного зонда, а также сопротивление заземляющих устройств можно измерять различными приборами, в том числе специальными измерительными сопротивлениями.

2.1.7.3 Метод вертикального электрического зондирования

Электрические параметры заземлителей и устройств для выравнивания электрических потенциалов полностью определяются их размерами и электрической структурой земли т.е. распределением удельного сопротивления в верхних слоях земной коры, в пределах которой наблюдается растекание токов.

При расчетах заземлителей и устройств для выравнивания электрических потенциалов электрическая структура с достаточным для практических целей приближением может рассматриваться как многослойное (в наиболее важном частном случае двухслойное) проводящее полупространство удельными сопротивлениями, однородными в пределах каждого слоя и с границами слоев, параллельными поверхности земли. Для определения параметров электрической структуры земли и служит вертикальное электрическое зондирование. Оно основано на изучении удельных сопротивлений грунта путем создания в нем искусственного электрического поля, позволяющего судить о значениях ρ в различных слоях земли. При этом могут быть использованы постоянные, пульсирующие и переменные электрические поля низкой частоты. Физическая сущность вертикального электрического зондирования сводится к следующему. В землю при помощи двух точечных заземлителей (питающих электродов А и В) от источника питания Е вводится электрический ток I рис. 2.8.

В теории геоэлектрических методов исследований доказывается, что заземляющий электрод любой конфигурации можно рассматривать как точечный начиная с расстояний, приблизительно в 5 раз превышающих протяженность его заглубленной части. То же положения относится и к системам из нескольких электродов. Такая система, какой бы сложной конфигурации она ни была, будет эквивалентна точечному заземлителю в случае, если наблюдения выполняются в точках, удаленных от центра системы на расстояние, превышающее в 5 раз расстояние между двумя наиболее удаленными друг от друга крайними электродами системы.

Электрический ток, проходя по толще земли от одного электрода к другому, захватит большие глубины. Ближе к электродам и вообще поверхности земли плотность тока больше, а с глубиной она уменьшается и на очень больших глубинах практически становится равной нулю.

Общая картина распространения тока в земле приведена на рисунке 2.8 где сплошными линиями показаны линии тока, а пунктирными — эквипотенциальные, т.е. линии равных потенциалов.

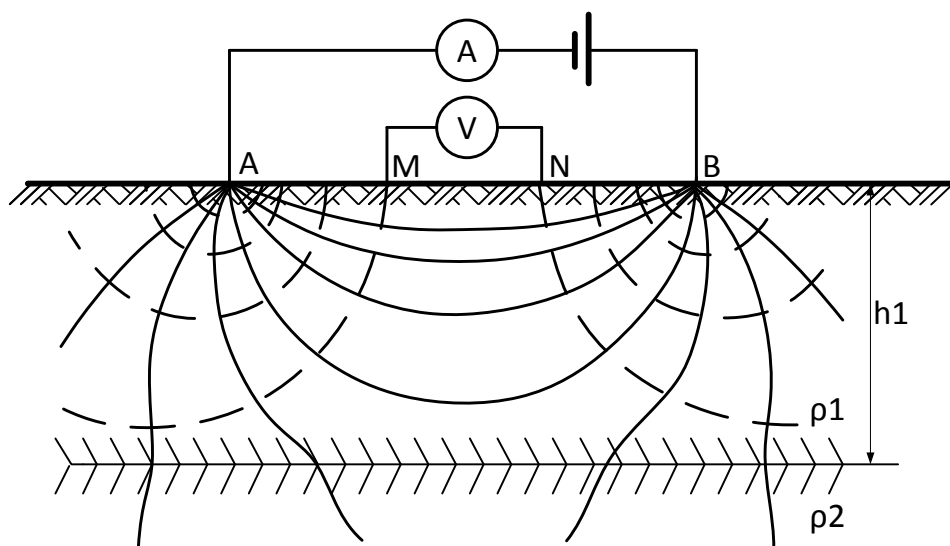


Рисунок 2.8 – Электрическое поле в земле при вертикальном электрическом зондировании

Поскольку земля, как мы уже знаем, обладает сопротивлением, то в ней на всех участках происходит падение напряжения. Если поместить в пределах поля

два приемных (потенциальных) электрода М и N, то между ними возникнет разность электрических потенциалов ΔU , которая связана со значением питающего тока I формулой:

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I}, \quad (2.13)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление среды, расположенной в пределах установки AMNB;

K – коэффициент, зависящий только от взаимного расположения электродов.

Заметим, что формула в таком виде, как она записана, справедлива только для однородной среды, т.е. для среды с одинаковым удельным сопротивлением, или по крайней мере для среды, у которой области иными удельными сопротивлениями находятся настолько далеко от измерительной установки, что их влияние на результаты измерений практически неощутимо. Когда же среда электрически неоднородна, то, проводя те же самые измерения и вычисления, мы получаем некоторую величину, которая будет находится в сложной зависимости от залегания пород в пределах данного участка, от удельных электрических сопротивлений этих пород и от размера установки, т.е. от расстояний между её электродами. Эту величину принято называть кажущимся удельным электрическим сопротивлением и обозначать ρ_k . В то время как значение удельного электрического сопротивления, найдено по (2), при измерениях в однородной среде остается одним и тем же при любых расстояниях между электродами, значение кажущегося удельного сопротивления в неоднородной среде существенно зависит от расстояния между электродами. Изучения изменений удельного сопротивления при различных расстояниях между электродами измерительной установки дает материал для суждений о характере строения той среды, над которой проводятся измерения. В этом и заключается сущность метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Для ВЭЗ используются установки различного типа, изменение которых

определяется, с одной стороны, условиями задачи (размерами территории подстанции, токами однофазных коротких замыканий на землю и т.д.), и, с другой стороны, соображениями технического характера – удобством перемещения, наличием аппаратуры, источников питания и т.д.

Некоторые из этих установок в настоящее время имеют исторический интерес и применяются сравнительно редко, другие являются основными установками современной электроразведки. Рассмотрим некоторые из них.

2.1.7.4 Двухполюсная установка

Питающая цепь этой установки состоит из электрода А, около которого на некотором расстоянии находится один из измерительных электродов М. Другой измерительный электрод N и второй питающий электрод В находятся настолько далеко от электродов А и М и друг от друга, что можно считать, что потенциал измерительного электрода N практически равен нулю, а влияние удаленного питающего электрода В на измерительный электрод М также практически отсутствует. В таком случае измеряемая разность электрических потенциалов между электродами М и N будет равна потенциалу точки М, наведенному току, стекающим с электрода А. Этот потенциал для однородной земли выражается уже известной нам формулы $\varphi_r = \frac{I\rho}{2\pi r}$, из которой нетрудно определить значение удельного сопротивления

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} \cdot 2\pi r, \quad (2.14)$$

где ΔU – измеряемая разность электрических потенциалов между электродами М и N;

I – ток в цепи АВ.

Множитель К для этой установки, как видно из формулы, определяется равенством

$$K = 2\pi r. \quad (2.15)$$

2.1.7.5 Трехполюсная установка Гуммеля

Питающие электроды АВ в этой установке расположены также как и в предыдущем случае а потенциальные электроды MN находятся возле токового электрода А на прямой линии проходящей через этот электрод, причем расстояние АМ равно расстоянию MN и равно некоторой величине r . Для этой установки разность электрических потенциалов ΔU между точками М и N равна:

$$\Delta U = \frac{I_\rho}{2\pi r} - \frac{I_\rho}{2\pi 2r} = \frac{I_\rho}{4\pi r}, \quad (2.16)$$

откуда

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} \cdot 2\pi r, \quad (2.17)$$

следовательно,

$$K = 4\pi r. \quad (2.18)$$

2.1.7.6 Трехполюсная установка Шлюмбеже

Отличается от установки Гуммеля тем, что в ней расстояние АМ больше чем расстояние MN. Если обозначить расстояние от токового электрода А до середины MN r , а расстояние между потенциальными электродами MN l , то ΔU можно выразить

$$\Delta U = \frac{I_\rho}{2\pi \left(r - \frac{l}{2}\right)} - \frac{I_\rho}{2\pi \left(r + \frac{l}{2}\right)} = \frac{I_\rho}{2\pi r^2} \cdot \frac{l}{1 - \frac{l^2}{4r^2}}, \quad (2.19)$$

отсюда находим ρ :

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} \frac{2\pi r^2 \left(1 - \frac{l^2}{4r^2}\right)}{l} \quad (2.20)$$

т.е.

$$K = \frac{2\pi r^2}{l} \left(1 - \frac{l^2}{4r^2}\right) \quad (2.21)$$

Если l весьма мало по сравнению с r , то с достаточной степенью точности можно написать

$$\rho = \frac{\Delta U}{Il} 2\pi r^2 \quad (2.22)$$

или, обозначая среднее значение градиента потенциала по направлению r (одинаковому с направлением l) через E , получим:

$$\rho = \frac{E}{Il} 2\pi r^2 \quad (2.23)$$

2.1.7.7 Четырехполюсная установка

В ней питающей и потенциальные электроды находятся на одной прямой от конечного расстояния друг от друга (рис.1.7.1.1). Для этой установки можно записать:

$$\begin{aligned}\Delta U &= \varphi_M - \varphi_N = \frac{I_\rho}{2\pi AM} - \frac{I_\rho}{2\pi BM} - \frac{I_\rho}{2\pi AN} + \frac{I_\rho}{2\pi BN} = \\ &= \frac{I_\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right),\end{aligned}\quad (2.24)$$

таким образом,

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} \cdot \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}, \quad (2.25)$$

Коэффициент К для этой установки, следовательно, будет равен:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (2.26)$$

Заметим, что формула (2.26) является универсальной, т.е. она справедлива для всех рассматриваемых установок вертикального электрического зондирования.

2.1.7.8 Четырехполюсная установка Веннера

Эта установка является частным случаем предыдущей, когда все электроды расположены на одинаковом расстоянии друг от друга: $AM=MN=NB=L/3=a$. Для этой установки

$$K = \frac{2}{3} \cdot \pi L = 2\pi a. \quad (2.27)$$

2.1.7.9 Четырехполюсная установка Шлюмберже

Она отличается от обычной четырехполюсной установки лишь тем, что расстояние между электродами М и N мало по сравнению с АВ и расстояниями измерительных электродов от питающих (отличаются в 10 раз и более).

Обозначив r расстояние от электрода А до середины отрезка MN и l – длину отрезка MN, получим в соответствии с общей формулой значения для коэффициента К:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{l}{r^2 \left(1 - \frac{l^2}{4r^2}\right)} + \frac{l}{(AB - r)^2 \cdot \left(1 - \frac{l^2}{(AB - r)^2}\right)}}, \quad (2.28)$$

при весьма малом l коэффициент К примет вид:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{l}{r^2} + \frac{l}{(AB - r)^2}}. \quad (2.29)$$

2.2.7.10 Симметричная четырехполюсная установка Шрюмберже

Эта установка является частным случаем предыдущей. Ее особенность состоит в том, что все электроды расположены симметрично относительно середины отрезка АВ. В этом случае формулы для подсчета ρ значительно упрощаются, так как $r=AB/2$. Действительно, формула для К теперь примет вид:

$$K = \frac{\pi AB^2}{4l} \left(1 - \frac{l^2}{AB^2}\right) = \frac{\pi(AB^2 - l^2)}{4l} \quad (2.30)$$

Если и здесь положить l очень малом по сравнению с АВ, то для определения ρ получим еще более простую формулу:

$$\rho = \frac{E}{L} \frac{\pi AB^2}{4} \quad (2.31)$$

В заключение мы ещё раз напомним, что любой из рассмотренных установок мы измеряем разность электрических потенциалов между приемными электродами М и N и значение тока в цепи I . Умножая отношения этих величин

на рассчитанные для каждой установки значения коэффициента K , мы определяем удельное электрическое сопротивление при определенных расстояниях между электродами. Заметим, что если во всех перечисленных случаях разность электрических потенциалов измеряется на интервале, малом по сравнению с расстоянием между питающими электродами, то можно сочетать, что измеряется градиент потенциала электрического поля. Подобные установки носят название градиентных. В геофизике доказывается, что эти установки наиболее чувствительны к измерениям электрического поля, в результате чего они во многих случаях оказываются более эффективными для целей проектных изысканий под будущий заземлитель. При удалении одного из приёмных электродов на достаточно большое расстояние мы измеряем по существу потенциал другого электрода. Эти установки получили название потенциальных. В энергетике для вертикального электрического зондирования земли наибольшее распространение получила четырехэлектродная несимметричная установка Бургсдорфа.

2.1.7.11 Установка Бургсдорфа или метод “амперметра – вольтметра”

Перед началом измерений на территории объекта выбирают площадку, свободную от подземных коммуникаций (трубопроводы, бронированные кабели и т.п.) и металлоконструкций, влияющих на результаты измерений.

В центре площадки на поверхности земли по одной прямой линии устанавливают 4 электрода, и собирают электрическую схему, представленную на (рис 2.9). В качестве электродов применяют стальные неокрашенные стержни. Расстояние MN между потенциальными электродами выбирается из условия: $MN < AB/3$. Глубина погружения потенциальных электродов B должна удовлетворять условию: $b < MN/6$

глубина погружения таковых электродов d должна удовлетворять условию $d < AB/6$.

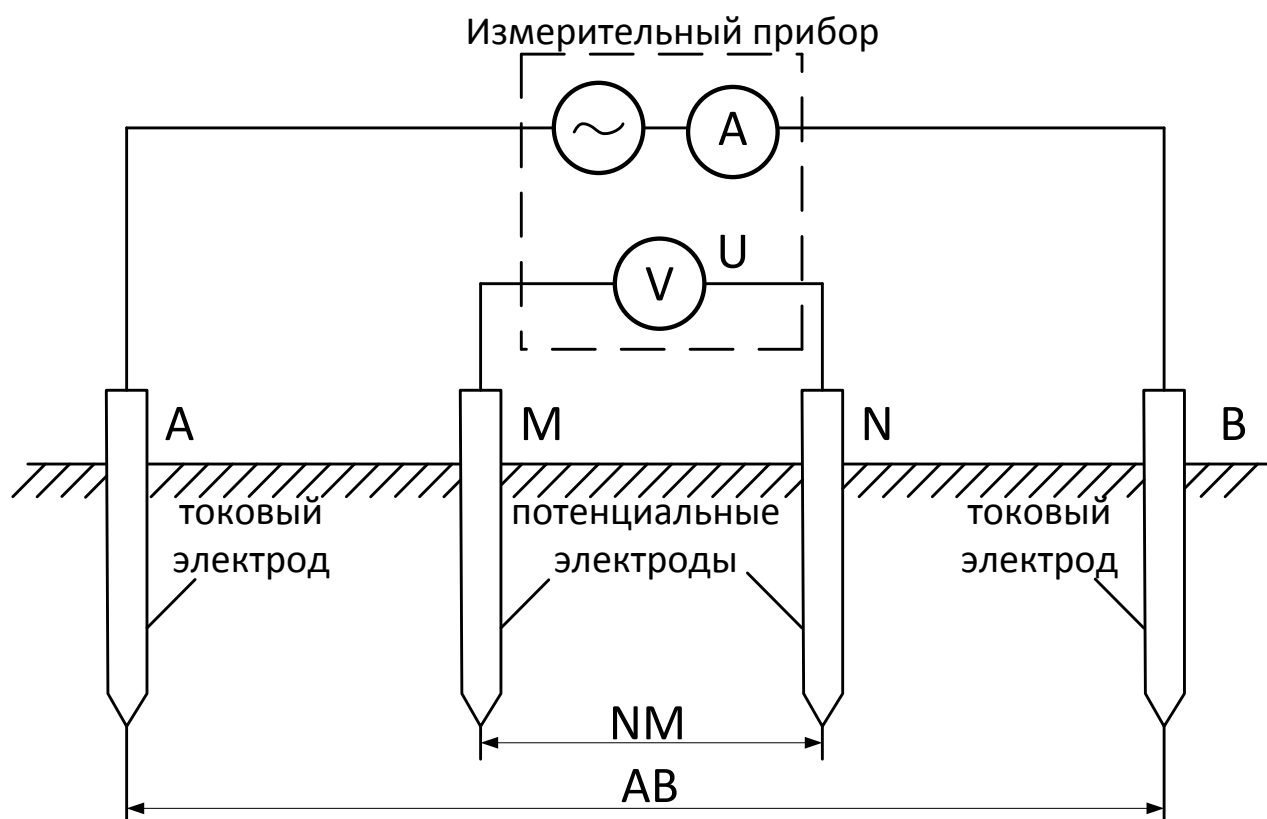


Рисунок 2.9 – Схема измерительной цепи для определения значений удельного сопротивления грунта

Включает источник тока генерирующего блока прибора частотой до 80 Гц, измеряют значение выходного тока прибора I и разности потенциалов U между потенциальными электродами. Повторяются следующие измерения при других значениях AB . Расстояние AB и MN рекомендуется увеличивать в последовательности, указанной в таблице 2.5. При уменьшении измеряемой величины U до значения порога чувствительности вольтметра необходимо увеличивать расстояние MN и повторить измерение при том же расстоянии AB , после чего расстояние AB увеличивать далее. Результаты измерений заносятся в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты измерений для определения характеристик электрической структуры грунта по методу ВЭЗ

№ измерения	AB/2, м	MN, м	k, м	I, мА	U, мВ	$R_{\text{каж}} = U/I$	$\rho_{\text{каж}}, \text{Ом} \cdot \text{м}$
1	1	0,5	5,890				
2	2	0,5	24,74				
3	3	0,5	56,16				
4	3	2	12,57				
5	4,5	2	30,24				
6	6,0	2	54,98				
7	9,0	2	125,7				
8	15	2	351,9				
9	15	10	62,83				
10	25	2	980,2				
11	25	10	188,5				
12	40	10	494,8				
13	65	10	1319				
14	65	40	300,4				
15	100	10	3134				
16	100	40	754,0				

Для каждого измерения определяют «кажущееся» значение удельного сопротивления грунта $\rho_{\text{каж}}$ по формуле (следует отметить, что многие приборы измеряют не падение напряжения U между потенциальными электродами, а значение эквивалентного сопротивления $R_{\text{каж}}=U/I$):

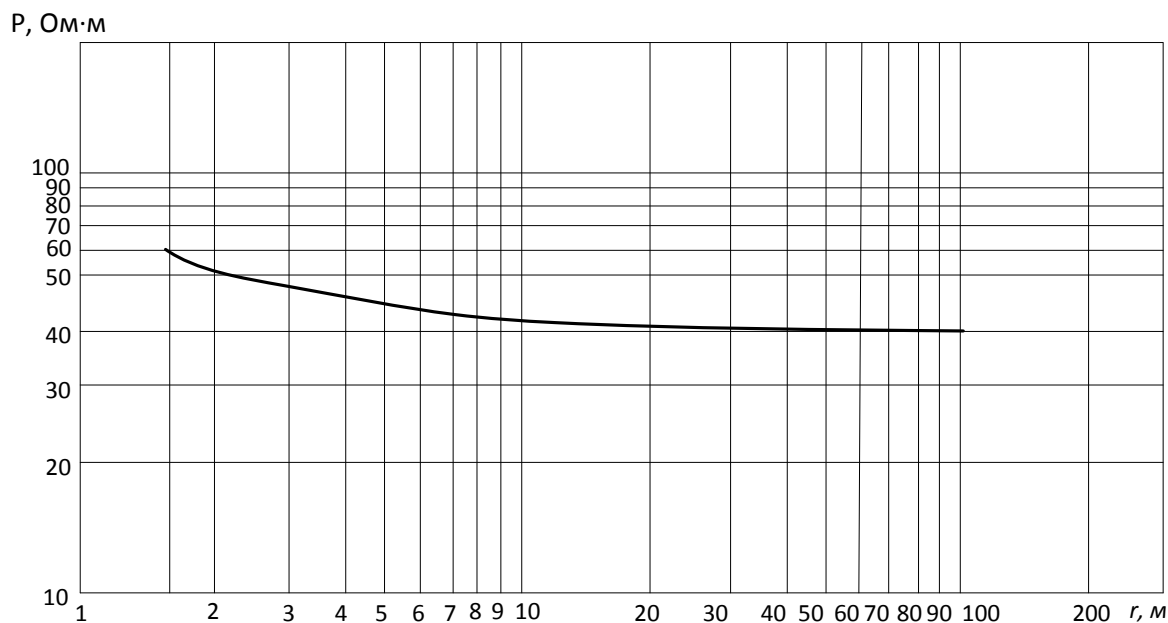
$$\rho_{\text{каж}} = R_{\text{каж}} \cdot k = \frac{U}{I} \cdot k, \quad (2.32)$$

где k – коэффициент установки, приведенные в таблице 2.5 для каждого из сочетаний разносов электродов.

Результаты расчётов заносятся в таблицу 2.5. По результатам измерений в билогарифмических координатах строят кривую ВЭЗ – зависимость

«кажущегося» удельного сопротивления грунта от полуразноса на токовых электродах $BD/2$.

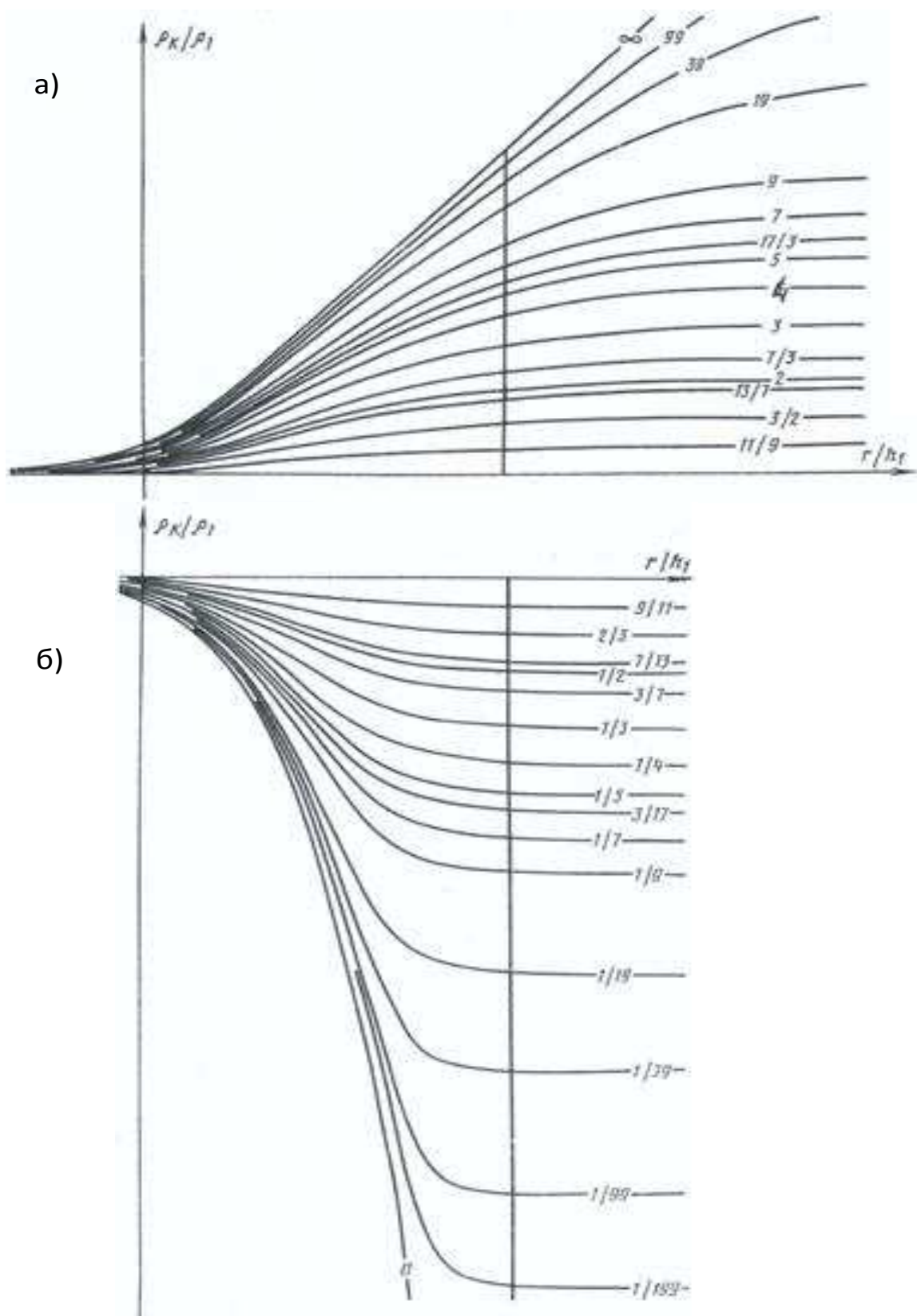
Например, при измерении по методу амперметра – вольтметра полученную зависимость, представленную на рис. 2.10



1

Рисунок 2.10 – Билогорифмические координаты для построения зависимости $\rho = f(r)$

Стандартные кривые зависимостей $\rho_K = f(r)$ для двухслойной модели грунта приведены на (рис. 2.11)



а - $\rho_1 < \rho_2$; б - $\rho_1 > \rho_2$

Рисунок 2.11 – Стандартные кривые зависимости $\rho_K = f(r)$ для двухслойной модели грунта.

Полученная зависимость $\rho = f(r)$

По оси ординат определяем уравнение сопротивления верхнего слоя грунта $\rho_1 = 59 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. По оси абсцисс определяем глубину верхнего слоя грунта: $h_1 = 1,5 \text{ м}$.

Находим значения удельного сопротивления верхнего слоя грунта

$$\rho_3 = \mu \cdot \rho_2 = \frac{3}{4} \cdot 59 = 44,25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

При этом считаем, что глубина нижнего слоя равна бесконечности. Таким образом, имеем следующие параметры двухслойной модели грунта

$$\rho_1 = 59 \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad h_1 = 1,5 \text{ м}$$

$$\rho_2 = 44,25 \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad h_2 = \infty$$

Анализ методов электропроводности грунта показывает, что наиболее эффективный и достоверный является метод ВЭЗ данный метод выберем как основной для разработки стенда.

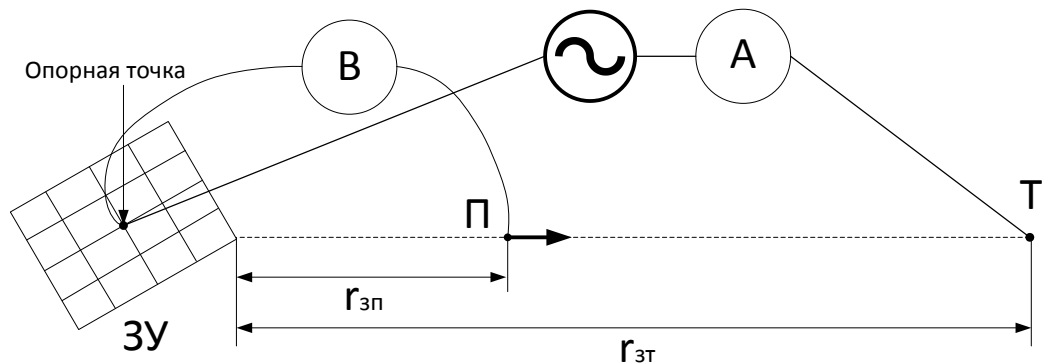
2.2 Анализ методов оценки сопротивления заземляющих устройств подстанций

Для оценки заземляющих устройств подстанции используют 2 метода: инструментальный и расчетный. Расчетный метод используется для оценки сопротивления заземления и заземляющих устройств подстанции если невозможно выполнить непосредственное измерение. К таким условиям относится зимний период времени года, и плотная застройка гражданскими и промышленными объектами вокруг подстанции. Рассмотрим более детально вышеуказанные методы:

2.2.1 Метод непосредственного измерения сопротивления заземления

Измерение сопротивления заземляющего устройства выполняют по методу амперметра-вольтметра. Принципиальная схема измерений приведена на (рис. 2.12).

Источник переменного тока подключают к ЗУ объекта (как правило, в опорной точке) и токовому электроду, вынесенному за пределы территории, на которой расположено ЗУ. Вольтметр подключают к ЗУ в той же точке, где подключен источник тока, и к вынесенному потенциальному электроду. Потенциальный электрод размещают на линии, соединяющей опорную точку и токовый электрод. Расстояния до токового и потенциального электродов от края заземлителя выбирают в зависимости от размеров заземлителя и наличия свободной от подземных коммуникаций территории за пределами заземляющего устройства.



П – потенциальный электрод, Т – токовый электрод

Рисунок 2.12 – Схема измерения сопротивления заземляющего устройства

Если ЗУ имеет небольшие размеры, а вокруг него имеется обширная площадь, свободная от линий электропередачи и подземных коммуникаций, то расстояния до электродов выбираются следующим образом: $r_{зт} \geq 5Д$; $r_{зп} = 0,5r_{зт}$. Здесь $Д$ – наибольший линейный размер ЗУ, характерный для данного типа заземлителя (для заземлителя в виде многоугольника – диагональ ЗУ, для

глубинного заземлителя – длина глубинного электрода, для лучевого заземлителя – длина луча).

Если ЗУ имеет большие размеры и отсутствует возможность размещения электродов, как указано выше, токовый в электрод следует разместить на расстоянии $r_{зт} \geq 3Д$. Потенциальный электрод размещается последовательно на расстоянии $r_{зп} = 0,1r_{зт}, 0,2r_{зт}, 0,3r_{зт}, 0,4r_{зт}, 0,5r_{зт}, 0,6r_{зт}, 0,7r_{зт}, 0,8r_{зт}, 0,9r_{зт}$ и производят измерения значений сопротивления. По данным измерений строят кривую в зависимости сопротивления от расстояния потенциального электрода до ЗУ. Если вид полученной зависимости соответствует изображённой на (рис.2.13), а значения сопротивлений, измеренных при положении потенциального электрода на расстояниях $0,4L_t$ и $0,6L_t$ отличаются не более, чем на 10%, то за сопротивление ЗУ принимают значение сопротивления на расстоянии $0,5L_t$. Если кривая немонотонная, что является следствием влияния различных коммуникаций (подземных и наземных), измерение повторяют при расположении электродов в другом направлении от ЗУ.

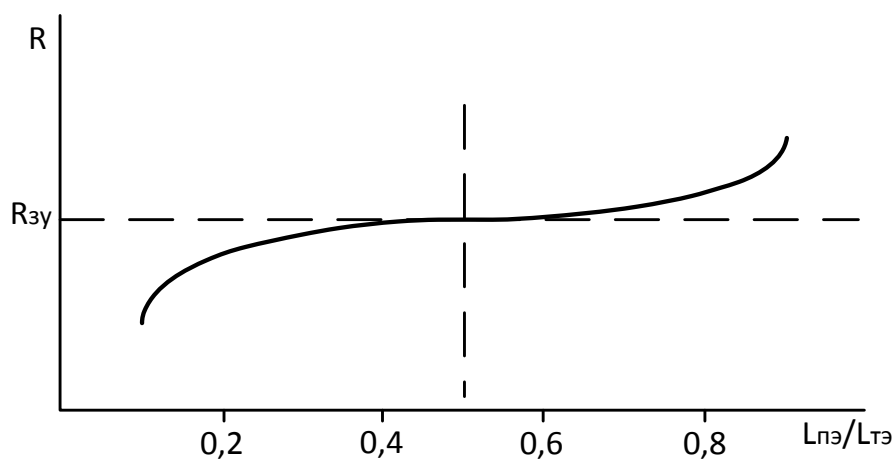


Рисунок 2.13 – Зависимость измеренного сопротивления от положения потенциального электрода

Перед началом измерения по исполнительной схеме ЗУ определяют место подключения источника переменного тока к ЗУ и месторасположения токового электрода, вынесенного за пределы территории ЗУ. Для исключения возможного

влияния посторонних токов на результаты измерений, необходимо проверить наличие напряжения между ЗУ и потенциальным электродом при отключенном источнике измерительного тока. При наличии напряжения от посторонних токов необходимо принять меры к уменьшению его влияния, увеличив измерительный ток или селективность отстройки по частоте. Для уменьшения влияния посторонних токов рекомендуется также изменить направление разноса такового и потенциального электродов.

Измерение сопротивления производят без отсоединения грозозащитных тросов, оболочек отходящих кабелей и других естественных заземлителей. Расстояние от ЗУ до токового и потенциального электродов выбирают в зависимости от размеров ЗУ и характерных особенностей территории вокруг ЗУ.

При производстве измерения в качестве вспомогательных электродов применяют стальные стержни или трубы диаметром до 50мм. Стержни должны быть очищены от краски, а в месте присоединения соединительных проводников и от ржавчины. Стержни забивают или ввинчивают в грунт на глубину 1,0 – 1,5 м. В случае необходимости токовый электрод выполняют из нескольких параллельно соединенных электродов, размещаемых по окружности, с расстоянием между ними 1,0 – 1,5 м.

Для приведения результатов измерения к наихудшим условиям, которые могут быть в эксплуатации, применяется повышающий сезонный коэффициент $K_{сез}$ для определения сопротивления заземляющего устройства. Значения сезонных коэффициентов приведены в таблицах 2.10 и 2.11.

Таблица 2.10 Сезонные коэффициенты удельного сопротивления грунта $K_{р\text{ сез}}$

Тип грунта	Сезонный коэффициент удельного сопротивления грунта при влажности		
	малой	средней	большой
Глина	2	3	10
Супесь, суглинок	3	5	20
Песок	3	10	50

Таблица 2.11 Сезонные коэффициенты для определения сопротивлений заземлителей.

Значение корня квадратного из площади ЗУ \sqrt{S} , м	Электрическое строение грунта	K _p	Сезонные коэффициенты в географических районах								
			Европейская часть 48-й параллели			Европейская часть и Западная Сибирь между 48 и 57-й параллелями, Ленинградская, Новгородская, Сахалинская обл., Приморский край			Остальная территория России		
0-6	30	50	0-6	30	50	0-6	30	50			
10	Грунтовые воды	3	1,4	1,3	1,0	1,5	1,5	1,1	1,1	1,9	1,2
		20	1,9	1,5	1,1	2,8	2,1	1,1	5,4	4,8	1,4
		50	2,0	1,5	1,1	4,0	2,2	1,1	10	8,5	1,4
	Однородный	3	1,1	1,1	1,0	1,4	1,1	1,0	2,0	1,4	1,0
		20	1,4	1,1	1,0	4,4	1,2	1,0	9,2	5,9	1,0
		50	1,8	1,1	1,0	9,5	1,3	1,0	22	14	1,0
	Подстилающие породы, скальные	3	1,2	1,0	1,0	2,3	1,0	1,0	2,7	2,6	1,0
		20	2,9	1,1	1,0	13	1,1	1,0	17	16	1,0
		50	5,7	1,1	1,0	32	1,1	1,0	43	40	1,0
50	Грунтовые воды	3	1,2	1,1	1,0	1,2	1,2	1,0	1,5	1,5	1,2
		20	1,4	1,2	1,0	1,7	1,7	1,1	2,5	2,9	1,3
		50	1,5	1,3	1,1	2,3	2,0	1,1	3,9	4,5	1,3
	Однородный	3	1,1	1,1	1,0	1,3	1,2	1,0	1,5	1,3	1,0
		20	1,3	1,1	1,0	3,2	1,9	1,0	4,5	4,5	1,0
		50	1,6	1,2	1,0	6,8	2,2	1,0	11	10	1,0
	Подстилающие породы, скальные	3	1,2	1,1	1,0	2,1	1,3	1,0	2,4	2,4	1,0
		20	2,5	1,5	1,1	11	1,6	1,0	14	14	1,0
		50	4,8	2,0	1,1	28	1,6	1,0	35	35	1,0

500	Грунтовые воды	3	1,1	1,1	1,0	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1
		20	1,3	1,1	1,0	1,4	1,4	1,3	1,6	1,8	1,4
		50	1,3	1,2	1,0	1,8	1,8	1,4	2,3	2,5	1,6
	Однородный	3	1,1	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2	1,3	1,4	1,2
		20	1,2	1,1	1,0	2,9	2,7	1,5	3,9	4,0	1,6
		50	1,5	1,2	1,0	5,8	4,7	1,6	8,4	8,6	1,7
	Подстилающие породы, скальные	3	1,2	1,1	1,0	2,0	1,8	1,2	2,2	2,3	1,2
		20	2,2	1,4	1,0	11	5,4	1,3	13	13	1,3
		50	4,1	1,5	1,0	25	10	1,5	31	31	1,5

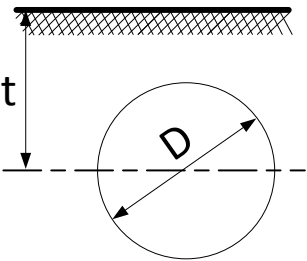
2.2.2 Расчетные методы оценки сопротивления заземляющих устройств

С помощью расчетных методов можно оценивать сопротивление одиночных и сложных заземлителей, как в однородной, так и двуслойной земле.

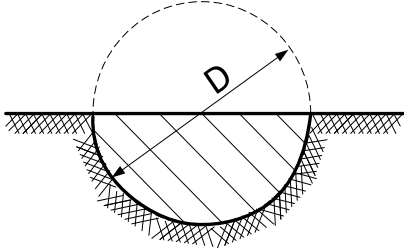
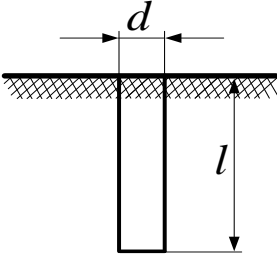
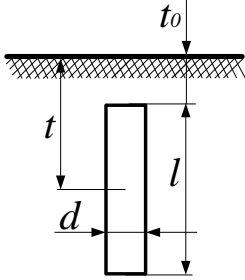
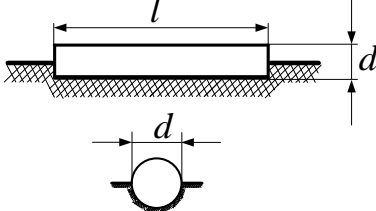
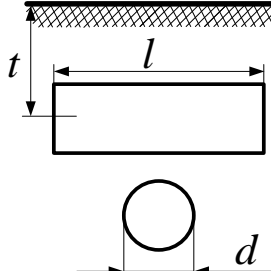
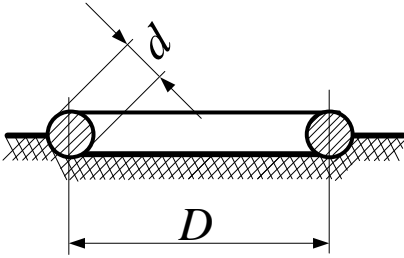
2.2.2.1 Метод оценки сопротивления одиночных заземлителей

Расчетные формулы для оценки сопротивления одиночных заземлителей приведены в таблице 2.12.

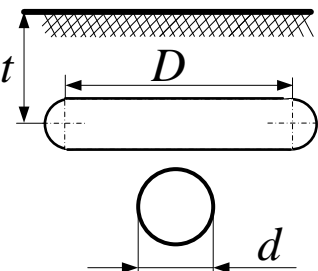
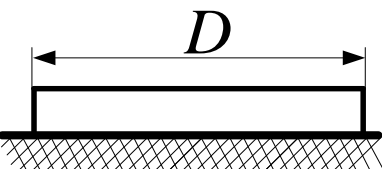
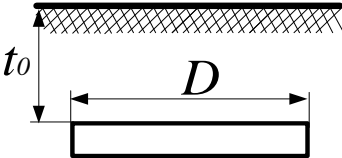
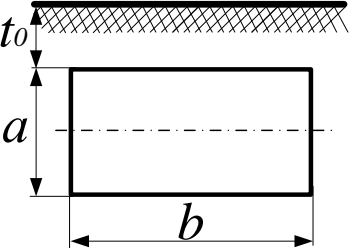
Таблица 2.12 Формулы для вычисления сопротивлений одиночных заземлителей растеканию тока в однородном грунте

Тип заземлителя	Схема	Формула	Условия применения
Шаровой земле		$R = \frac{\rho}{2\pi D} \left(1 + \frac{D}{4t} \right)$	$2t \gg D$

Продолжение таблицы 2.12

Полушаровой у поверхности земли		$R = \frac{\rho}{\pi D}$	—
Стержневой круглого сечения (трубчатый) или уголкового у поверхности земли		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$	$l \gg d$ для уголка с шириной полки b $d=0.95b$
То же в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+1}{4t-1} \right)$	$l \gg d; t_0 \geq 0,5$ м для уголка с шириной полки b $d=0.95b$
Протяженный на поверхности земли (стержень, труба, полоса, кабель и т.п.)		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l^2}{d^2}$	$l \gg d$ для полосы шириной b $d=0,5b$
То же самое в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{d}$	$l \gg d; l \gg 4t$ для полосы шириной b $d=0,5b$
Кольцевой на поверхности земли		$R = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{8D}{d}$	$D \gg d$ для полосы шириной b $d=0,5b$

Окончание таблицы 2.12

То же в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{4\pi D^2}{dt}$	$D \gg d; D \gg 2t$ для полосы шириной b $d=0,5b$
Круглая пластина на поверхности земли		$R = \frac{\rho}{2D}$	D – диаметр пластины
То же в земле		$R = \frac{\rho}{4D} \left(1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{D}{\sqrt{16t_0^2 + D^2}} \right)$	$2t_0 \gg D$
Пластина в земле (пластина поставлена на ребро)		$R = \frac{\rho}{2\pi a} \left(\ln \frac{4a}{b} + \frac{a}{4t_0} \right)$	$2t_0 \geq a$

Примечание: В формулах ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м (1 Ом·м – сопротивление куба грунта с ребром длиной 1 м). Все размеры – в метрах, при этом R – будет выражено в омах.

2.2.2.2 Оценка сопротивления сложного заземлителя в однородной земле

Сопротивление сложного заземлителя в однородной земле в основном зависит от конструкции заземляющего устройства.

Сопротивление растеканию сложного заземлителя в виде горизонтальной квадратной сетки с квадратными ячейками одинакового размера и равномерным

размещением вертикальных электродов по контуру (периметру) заземлителя (рис.2.12, а) можно определить по следующей формуле:

$$R = A \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L_{\Gamma} + nl_{\text{в}}}, \quad (2.33)$$

где A – коэффициент, значение которого равно

$$A = 0,444 - 0,84t_{\text{отн}} \quad \text{при } 0 \leq t_{\text{отн}} \leq 0,1; \quad (2.34)$$

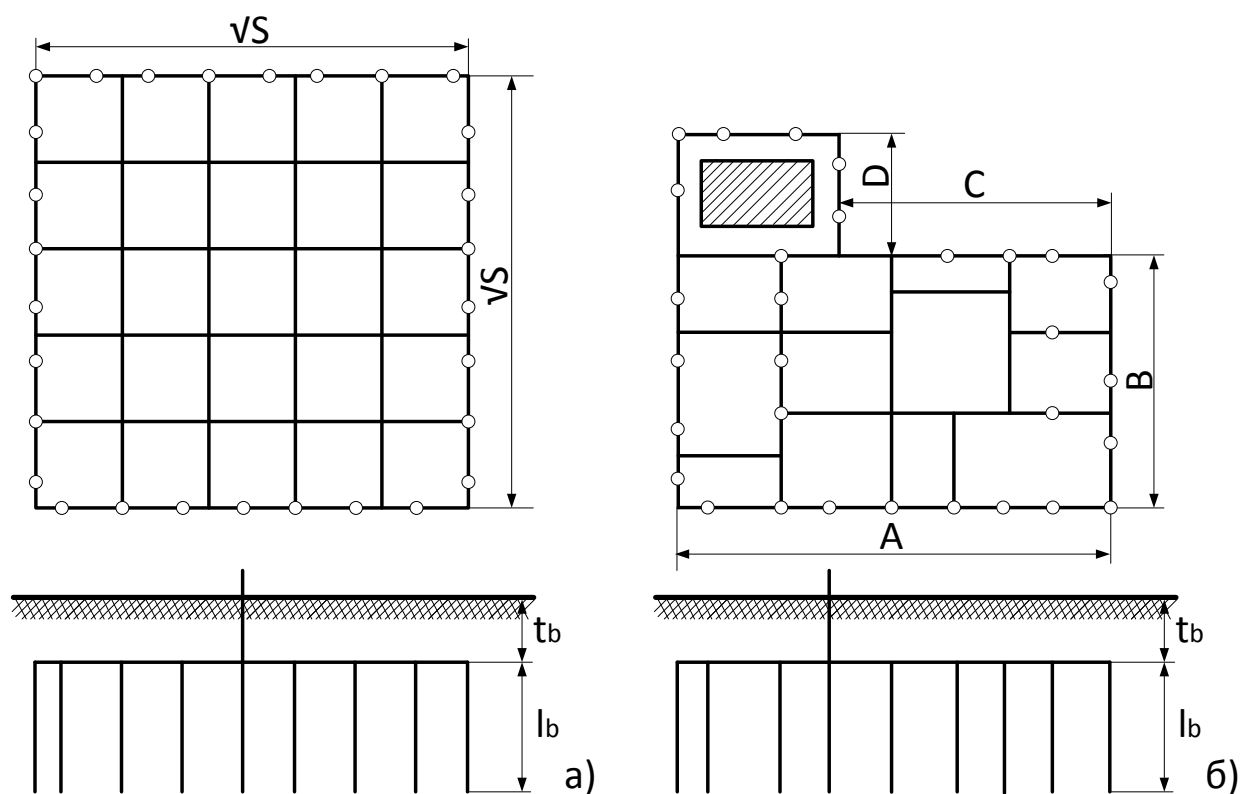
$$A = 0,385 - 0,25t_{\text{отн}} \quad \text{при } 0 \leq t_{\text{отн}} \leq 0,5; \quad (2.35)$$

$t_{\text{отн}}$ – относительная глубина погружения в землю вертикальных электродов:

$$t_{\text{отн}} = (l_{\text{в}} + t_{\text{в}})/\sqrt{S} \quad (2.36)$$

$t_{\text{в}}$ – глубина погружения в землю верхнего конца вертикального электрода, м; S – площадь, занимаемая заземлителем, м²; L_{Γ} – суммарная длина горизонтальных электродов, м; $l_{\text{в}}$ – длина вертикального электрода, м.

К такому виду может приведен любой сложный заземлитель в виде горизонтальной сетки с различным расположением горизонтальных и примерно равномерным размещением вертикальных электродов, например, заземлитель, показанный на (рис. 2.14, б). При этом однако, должны быть равны площади S , суммарная длина горизонтальных электродов L_{Γ} , количество и длина вертикальных электродов n и $l_{\text{в}}$, а также глубина заложения их в землю $t_{\text{в}}$.



а – в виде горизонтальной квадратной сетки с квадратными ячейками одинакового размера и равномерным размещением вертикальных электродов по контуру (периметру) заземлителя; б – в виде горизонтальной сетки с ячейками разной формы и размеров с различным расположением горизонтальных и примерно равномерным размещением вертикальных электродов

Рисунок 2.14 – Сложные заземлители в однородной земле

Сопротивление заземлителя в однородной земле, выполненного в виде сетки из горизонтальных электродов (без вертикальных), определяется также по формуле (2.20), в которой надо принять $l_b = 0$. В этом случае, поскольку $t_b = 0$ и согласно (2.23) и (2.21) $t_{отн} = 0$ и $A=0,444$, (2.20) приобретает вид

$$R = 0,444 \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L_r}. \quad (2.37)$$

Эта формула известна как формула Оллендорфа – Лорана.

Первый член ее выражает сопротивление растеканию сплошной квадратной металлической плиты со стороной \sqrt{S} , лежащей на поверхности

земли. Вместе с тем он определяет наименьшее сопротивление растеканию заземлителя, выполненного только из горизонтальных электродов. Второй член выражает разницу между сопротивлениями растеканию заземлителей в виде горизонтальной решётки и сплошной плиты.

Сопротивление контурного заземлителя в однородной земле, выполненного в виде горизонтальной прямоугольной решетки из прутков круглого сечения диаметром d , м, размещенной в земле на глубине t , м, можно определить методом электростатической аналогии, как и в случае одиночных заземлителей.

В данном случае применима следующая формула для расчета ёмкости, Φ , между бесконечной непроницаемой плоскостью и параллельной ей плоской прямоугольной решеткой:


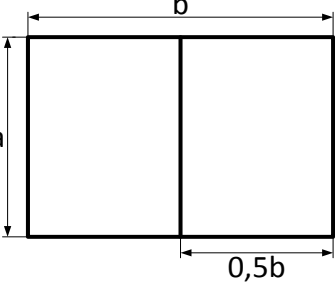
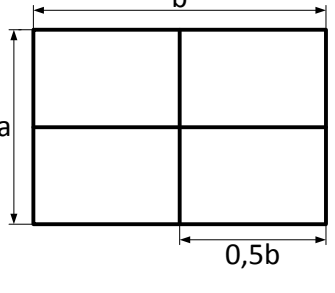
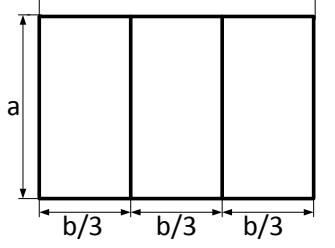
$$C_{o.п} = \frac{2\pi\epsilon L_r}{\ln \frac{L_r^2}{td} + m}, \quad (2.38)$$

Где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м; L_r – суммарная длина всех проводников, образующих решетку, м; t – расстояние между решеткой и плоскостью, м; m – коэффициент, зависящий от конфигурации решетки, соотношения её сторон и числа ячеек. Значения m для некоторых типов прямоугольных решеток приведены в табл.2.13.

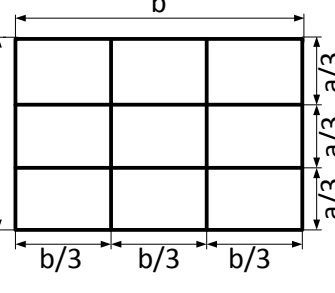
Заменив в этом выражении $C_{o.п}$ на $1/R$ и ϵ на $1/\rho$ и решив полученное уравнение относительно R , будем иметь выражение для определения сопротивления растекания решетки, Ом,

$$R = \frac{\rho}{2\pi L_r} \left(\ln \frac{L_r^2}{td} + m \right). \quad (2.39)$$

Таблица 2.13 Значения коэффициента m , входящего в формулу (2.25) и (2.26)

Конструкция решетки	Отношение сторон решетки				
	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0
	1,71	1,76	1,86	2,10	2,34
	3,67	3,41	3,31	3,29	3,35
	4,95	5,16	5,44	6,00	6,52
	4,33	4,43	4,73	5,04	5,61

Окончание таблицы 2.13

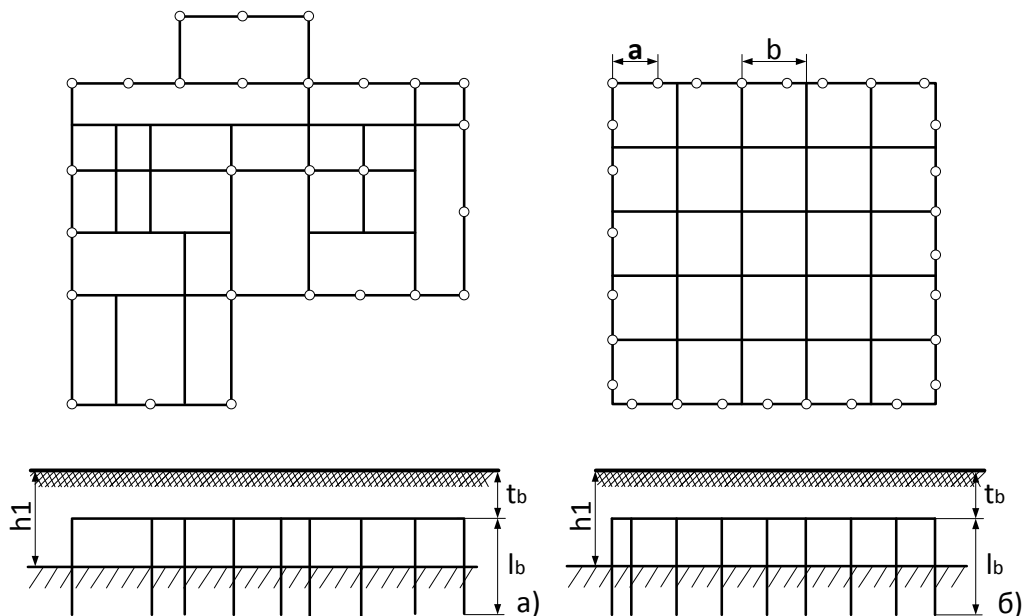
	8,55	8,94	9,40	10,3	11,11
---	------	------	------	------	-------

2.2.2.3 Групповой заземлитель в двухслойной земле

Сопротивление растеканию группового заземлителя в двухслойной земле R зависит от его конфигурации, параметров и эквивалентного удельного сопротивления земли $\rho_э$. Значение R вычисляется по тем же формулам, по которым вычисляется сопротивление растеканию аналогичных заземлителей в однородной земле при условии замены удельного сопротивления однородной земли на $\rho_э$.

Так, для вычисления сопротивления растеканию сложного группового заземлителя в двухслойной земле, выполненного в виде горизонтальной сетки (или контура) с вертикальными электродами (рис. 2.15), может быть использована формула (2.20)

$$R = A \frac{\rho_э}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_э}{L_Г + nl_в}. \quad (2.40)$$



а – сетка неправильной формы, вертикальные электроды размещены неравномерно; б – сетка квадратная с квадратными ячейками одинакового размера и равномерно размещенными вертикальными электродами по контуру заземлителя

Рисунок 2.15 – Сложные групповые заземлители в двухслойной земле, выполненные в виде горизонтальной сетки с вертикальными электродами

При отсутствии вертикальных электродов в указанной конструкции заземлителя применима формула (2.24)

$$R = 0,444 \frac{\rho_{\text{э}}}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_{\text{э}}}{L_{\Gamma}}. \quad (2.41)$$

Эквивалентное удельное сопротивление двухслойной земли, для сложного группового заземлителя в виде горизонтальной квадратной сетки с квадратными ячейками одинакового размера и равномерно размещенными вертикальными электродами по контуру (периметру) заземлителя (рис. 2.13, б) вычисляется по следующей формуле

$$\rho_{\text{э}} = \rho_2 (\rho_1 / \rho_2)^k, \quad (2.42)$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления верхнего и нижнего слоев земли соответственно, Ом·м;

k – показатель степени при $0,1 \leq \rho_1 / \rho_2 \leq 1$

$$k = 0,32 \left(1 + 0,26 \ln \frac{h_1}{l_{\text{в}}} \right); \quad (2.43)$$

при $1 \leq \rho_1 / \rho_2 \leq 10$

$$k = 0,43 \left(l_{\text{отн}} + 0,272 \ln \frac{a\sqrt{2}}{l_{\text{в}}} \right); \quad (2.44)$$

h_1 – толщина верхнего слоя земли, м; $l_{\text{в}}$ – длина вертикального электрода, м; a – расстояние между вертикальными электродами, м; $l_{\text{отн}}$ – относительная длина

верхней части вертикального электрода, т.е. части, находящейся в верхнем слое земли, м:

$$l_{\text{отн}} = (h_1 - t_{\text{в}})/l_{\text{в}}. \quad (2.45)$$

$t_{\text{в}}$ – глубина погружения в землю верхнего конца вертикального электрода, м.

Для того же заземлителя значение ρ_3 может быть определено с помощью табл.2.14

Таблица 2.14 Относительное эквивалентное расчетное удельное сопротивление для горизонтальных сеток с вертикальными электродами ρ_1/ρ_2

ρ_1/ρ_2	$a/l_{\text{в}}$	ρ_3/ρ_2 при относительной длине верхней части заземлителя $l_{\text{отн}}$						
		0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	0,95
0,125	0,5 – 2	0,95	0,9	0,8	0,7	0,62	0,54	0,52
0,25	0,5 – 4	0,97	0,93	0,85	0,78	0,71	0,65	0,64
0,5	0,5 – 4	0,99	0,96	0,92	0,88	0,83	0,79	0,77
1,0	1 – 4	1	1	1	1	1	1	1
2,0	1	1,02	1,03	1,05	1,1	1,13	1,3	1,4
	2	1,03	1,07	1,1	1,13	1,15	1,32	1,5
	4	1,05	1,17	1,13	1,15	1,2	1,38	1,6
5,0	1	1,05	1,1	1,15	1,22	1,35	1,86	2,4
	2	1,22	1,26	1,35	1,43	1,54	2,12	2,7
	4	1,33	1,41	1,5	1,65	1,83	2,6	3,5
10	1	1,1	1,2	1,28	1,38	1,62	2,5	3,7
	2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,75	5,5
	4	1,52	1,7	1,88	2,08	2,33	3,52	6,0

Анализ вышеприведенных методов оценки сопротивления сложных (групповых) заземлителей не учитывает условия эксплуатации заземляющих устройств, величину токов однофазного короткого замыкания, грозовую активность, качество выполняемых работ при монтаже заземляющих устройств и периодичность их проверок. Перечисленные факторы приводят к росту

сопротивления заземляющих устройств. Например, протекание токов короткого замыкания и токов молнии через заземляющее устройство способствует более интенсивному окислению отдельных элементов заземляющего устройства. Некачественное выполнение заземляющего устройства приводит к увеличению переходных сопротивлений в местах сварки отдельных элементов устройства. Длительный период между проверками заземляющих устройств влияет на несвоевременное выявление дефектов конструкции сложных заземлений, в результате сопротивление заземляющего устройства возрастает. Ниже приведем метод, который учитывает вышеуказанные факторы, влияющие на сопротивление заземляющего устройства – Метод определения сопротивления заземляющего устройства с учетом коэффициента эксплуатации.

2.2.2.4 Метод определения сопротивления заземляющего устройства с учетом коэффициента эксплуатации

Сопротивление заземления заземляющего устройства подстанции оценивается по выражению:

$$R_{3y} = K_э \cdot R_{cp}, \quad (2.46)$$

где R_{cp} – среднее значение сопротивления растекания тока с заземлителя, определяется уже по известной нам формуле (2.20). Ом; $K_э$ – коэффициент эксплуатации заземляющего устройства.

Коэффициент эксплуатации заземляющего устройства учитывает коррозию металла, качество монтажных работ, периодичность проверки, грозовую активность и максимальную величину тока КЗ в сетях свыше 1000В.

Коэффициенты эксплуатации определяют по формуле:

$$K_э = K_K + K_M + K_{II} + K_{Г} + K_{КЗ} \quad (2.47)$$

где $K_K = 1,02$ – коэффициент, учитывающий влияние коррозии металла на работоспособность ЗУ со сроком эксплуатации до 12 лет и $K_K = 1,1$ если срок эксплуатации ЗУ более 12 лет.

$K_M = 1,02 \div 1,05$ – коэффициент, учитывающий качество монтажных работ; K_{Π} – коэффициент, учитывающий периодичность проверки ЗУ: $K_{\Pi} = 1,03$ – для вновь вводимых в эксплуатацию подстанций, $K_{\Pi} = 1,05$ – периодичность проверки от 6 до 12 лет для подстанций, находящихся в эксплуатации; $K_{\Pi} = 1,08$ – периодичность проверки более 12 лет.

K_{Γ} – коэффициент, учитывающий грозовую активность в районе, где расположена подстанция: $K_{\Gamma} = 1,01 \div 1,03$ – если грозовая активность не превышает 50 ч в год, $K_{\Gamma} = 1,02 \div 1,05$ – если грозовая активность находится в диапазоне 51-80 ч в год, $K_{\Gamma} = 1,06 \div 1,07$ – если грозовая активность более 100 ч в год.

K_{K3} – коэффициент, учитывающий величину тока КЗ в сетях свыше 1000 В: $K_{K3} = 1,03 \div 1,05$ – если ток однофазного КЗ не превышает 10 кА, $K_{K3} = 1,06$ – если ток однофазного КЗ находится в диапазоне 10÷15 кА и $K_{K3} = 1,07 \div 1,08$ – если ток однофазного КЗ свыше 15 кА.

2.3 Выводы по второму разделу

На основании вышеизложенного материала при разработке стенда по изучению методов измерения электропроводности грунта и сопротивления заземляющего устройства необходимо соответственно руководствоваться методом вертикального электрического зондирования и методом амперметра – вольтметра. При этом полученные значения сопротивления заземляющего устройства должны совпадать с расчетным значением, которое определяется по методу оценки сопротивления сложного заземлителя с учетом коэффициента эксплуатации.

3 Компьютерное моделирование схемы стенда по оценке электрических параметров земли и заземляющих устройств

Компьютерное моделирование измерений электропроводности грунтов методом вертикального электрического зондирования и сопротивления ЗУ методом «Амперметра – Вольтметра» было выполнено на основе реальных измерений подстанции ПС 220кВ «Минусинская Опорная». В ходе инструментального измерения электропроводности грунта и сопротивления заземления получены следующие данные приведенные в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 Результаты измерений для определения характеристик электрической структуры грунта по методу ВЭЗ

№ измерения	AB/2, м	MN, м	k, м	I,мА	U, мВ	$R_{\text{каж}} = U/I$	$\rho_{\text{каж}}, \text{ Ом} \cdot \text{м}$
1	1	0,5	5,890	100	1002	10,2	59
2	2	0,5	24,74	100	210	2,1	52
3	3	0,5	56,16	100	82,8	0,828	46
4	3	2	12,57	100	381,9	3,819	48
5	4,5	2	30,24	100	145,5	1,455	44
6	6,0	2	54,98	100	78,2	0,782	43
7	9,0	2	125,7	100	33,1	0,331	42
8	15	2	351,9	100	11,7	0,117	41
9	15	10	62,83	100	65,3	0,653	41
10	25	2	980,2	100	4,2	0,0402	39
11	25	10	188,5	100	21,3	0,218	41
12	40	10	494,8	100	8,2	0,082	40,5
13	65	10	1319	100	3,1	0,031	40,5
14	65	40	300,4	100	13,5	0,135	40,5
15	100	10	3134	100	1,3	0,013	40
16	100	40	754,0	100	5,3	0,053	40

Таблица 3.2 Результаты измерений сопротивления заземления

$L_{пэ}/L_{тэ}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
I, А	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$U_{изм.}$, В	0,027	0,031	0,029	0,033	0,033	0,033	0,036	0,039	0,044
R, Ом	0,135	0,145	0,150	0,165	0,165	0,165	0,18	0,195	0,22

Приведённые результаты в таблицах 3.1 и 3.2 были приняты в качестве исходных данных для компьютерного моделирования

Согласно теории, изложенной во втором разделе, изменения $\rho_{каж}$ от расстояния между токовыми электродами должно плавно возрастать или убывать. Анализ результатов представлен в таблице 3.1 показывает, что результаты под номером 1 и 10 выпадают из общей закономерности. Для убедительного подтверждения теоретических исследований при моделировании электрических параметров земли примем $\rho_{каж}$ в измерении №3 и №10 соответственно равным 49 Ом·м и 41 Ом·м.

3.1 Моделирование метода вертикального электрического зондирования для измерения электропроводности грунта

Для получения более точных данных при измерении напряжения между электродами при моделировании, величина тока была принята 400 мА. При этом значения сопротивлений $R_{каж}$ и удельных сопротивлений грунта $\rho_{каж}$ соответственно равны данным, приведенным в таблице 3.1 с учетом принятых значений. Схема моделировалась в среде Multisim 12.0 и приведена на рис.3.1.

Разнос потенциальных и токовых электродов при моделировании принимался чисто условным. Для каждого положения токовых и потенциальных электродов, указанных в табл. 3.1 соответственно. В результате было смоделировано 16 точек измерения. Каждая точка моделировалась при помощи соответствующих переключений тумблеров.

Например, точка 1 получалась посредством включения тумблера SA1. Точка 2 имитировалась при помощи включения тумблера SA2 при этом тумблер SA1 остается во включенном положении. Дальнейшие точки имитировались аналогичным образом:

- точка 3 моделировалась в следующей последовательности, тумблер SA2 отключается, а тумблер SA3 включается;
- точка 4 моделировалась посредством отключения тумблера SA3 и посредством включения тумблера SA4 и т.д.

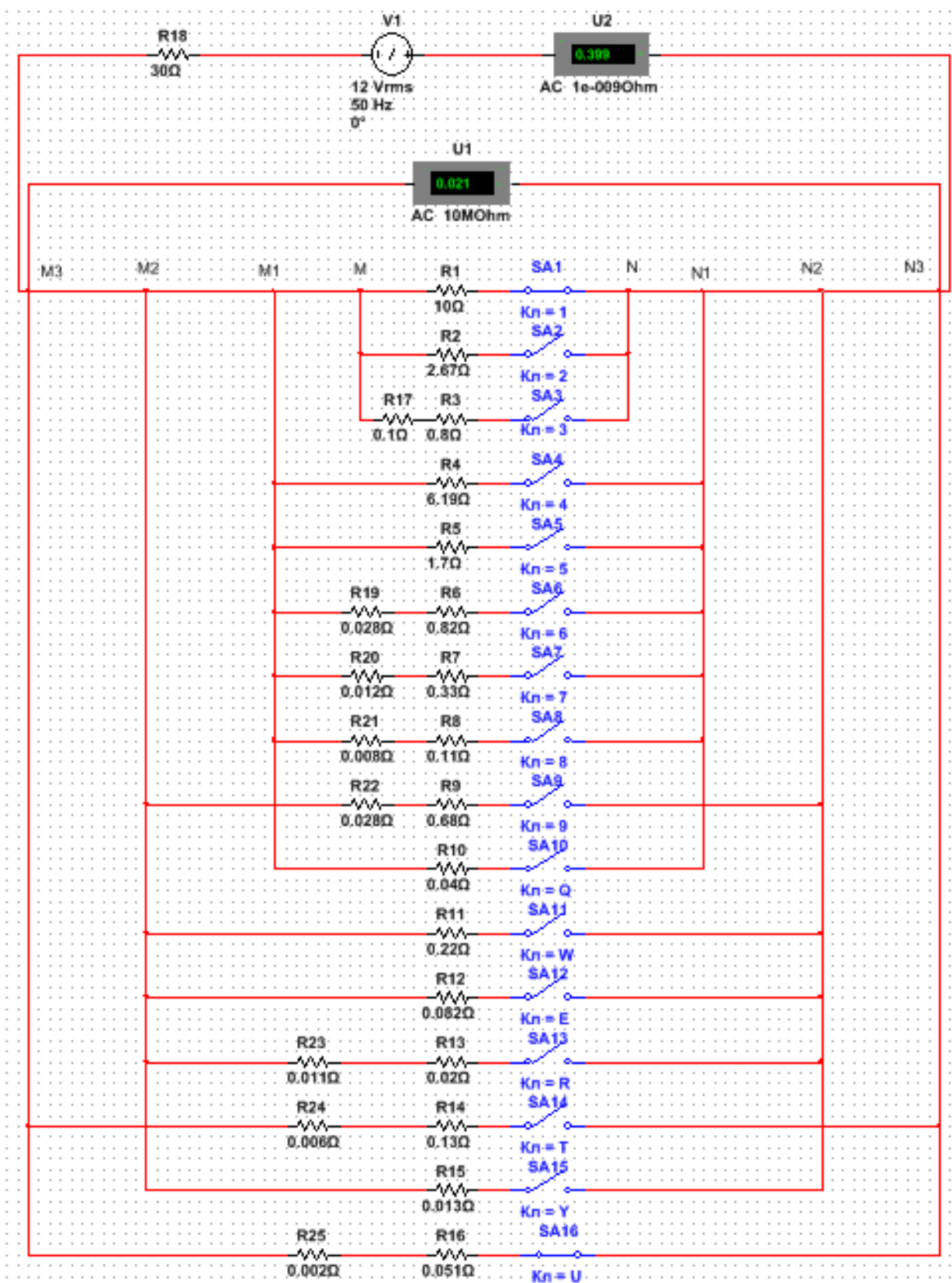


Рисунок 3.1 – Схема моделирования электропроводности грунта

Результаты измерения приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 Результаты моделирования для определения характеристик электрической структуры грунта по методу ВЭЗ

№ измерения	AB/2, м	MN, м	k, м	I, мА	U, мВ	$R_{\text{каж}} = U/I$	$\rho_{\text{каж}}, \text{ Ом} \cdot \text{м}$
1	1	0,5	5,890	400	4000	10	58,9
2	2	0,5	24,74	399	840	2,1	52
3	3	0,5	56,16	397	328	0,826	49
4	3	2	12,57	401	1533	3,823	48,054
5	4,5	2	30,24	398	578	1,452	43,92
6	6,0	2	54,98	398	311	0,781	42,96
7	9,0	2	125,7	404	134	0,332	41,69
8	15	2	351,9	398	47	0,118	41,56
9	15	10	62,83	399	264	0,662	41,57
10	25	2	980,2	399	16	0,0401	41
11	25	10	188,5	397	86	0,216	40,72
12	40	10	494,8	407	33	0,081	40,12
13	65	10	1319	400	12	0,03	39,57
14	65	40	300,4	406	55	0,135	40,55
15	100	10	3134	400	5,23	0,013	40,74
16	100	40	754,0	399	21	0,0526	39,68

Погрешность определяется по формуле:

$$\Delta, \% = \frac{\rho_{\text{изм.}} - \rho_{\text{мод.}}}{\rho_{\text{изм}}} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

Значения относительной погрешности приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4 Результаты погрешностей моделирования электропроводности грунта $\rho_{\text{каж}}$

№ измерения	Реальные измерения $\rho_{\text{каж}}, \text{Ом} \cdot \text{м}$	Значения моделирования $\rho_{\text{каж}}, \text{Ом} \cdot \text{м}$	Погрешность $\Delta, \%$
1	2	3	4
1	59	58,9	0,169
2	52	52	0
3	49	49	0
4	48	48,054	-0,113
5	44	43,92	0,182
6	43	42,96	0,093
7	42	41,69	0,738
8	41	41,56	1,365
9	41	41,57	1,390
10	41	41	0
11	41	40,72	0,683
12	40,5	40,12	0,938
13	40,5	39,57	2,296
14	40,5	40,55	-0,123
15	40	40,74	-1,850
16	40	39,68	0,800

Сопоставив реальные результаты измерений и результаты моделирования видно, что максимальная погрешность не превышает 2,3%, что является достаточным для практического использования схемы моделирования метода ВЭЗ.

Выполним проверку соответствия совпадения экспериментальной зависимости $\rho_{\text{каж}} = f(L_{AB})$ со стандартной кривой приведенной на рисунке

2.11. Для этой цели строим полученную зависимость при моделировании в билогорифмических координатах и сравниваем ее со стандартными кривыми.

На рисунке 3.2 приведена зависимость $\rho_{\text{каж}} = f(L_{AB})$ полученная при моделировании, которая близко совпадает со стандартной кривой изображенной на рис 2.11 с коэффициентом $\mu = 3/4$.

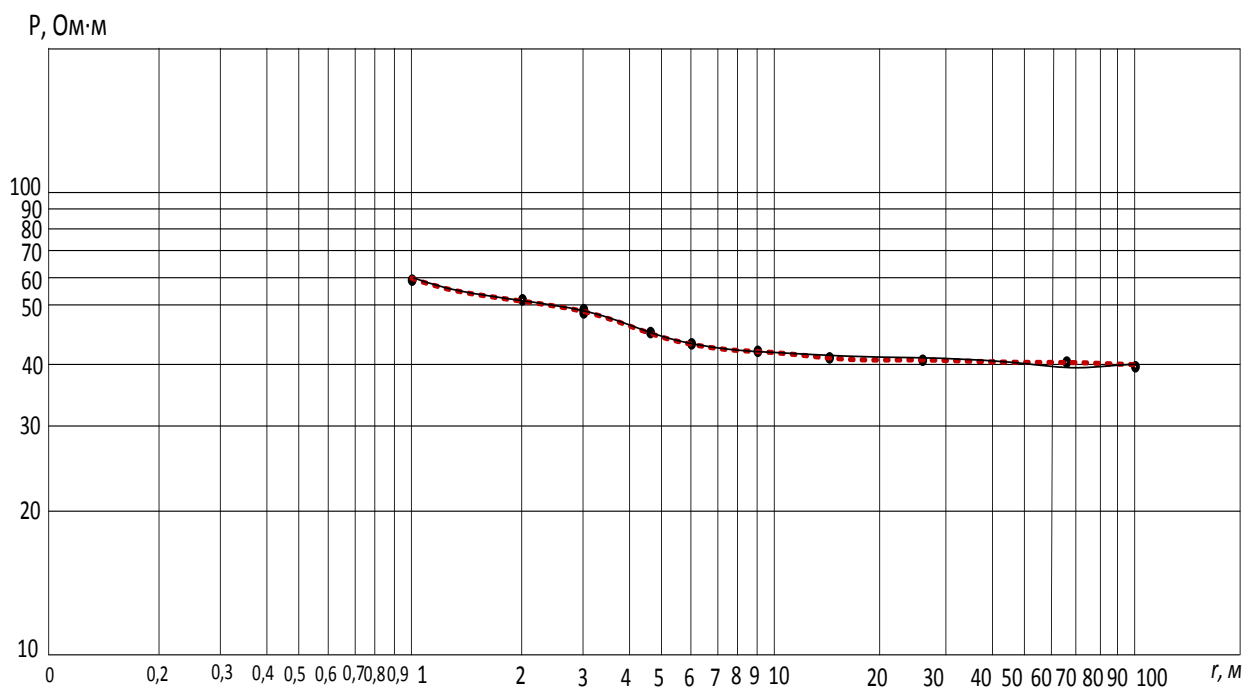


Рисунок 3.2 – Зависимость $\rho_{\text{каж}} = f(L_{AB})$.

В этом случае вертикальная ось в начальной точке кривых по оси абсцисс показывают толщину верхнего слоя $h_1 = 1$, а горизонтальная ось пересекаясь с осью абсцисс указывает на значение удельного сопротивления верхнего слоя $\rho_1 = 59 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. ρ_2 удельное сопротивление нижнего слоя грунта определялось по формуле $\rho_2 = \mu \cdot \rho_1$ и составляет $44 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Полученные результаты при моделировании двухслойной модели грунта в районе расположения ПС 220кВ “Минусинская опорная” практически совпадают с реальными значениями, которые равны:

$$\rho_1 = 59 \text{ Ом} \cdot \text{м}; h_1 = 1,5 \text{ м},$$

$$\rho_2 = 44 \text{ Ом} \cdot \text{м}; h_2 = \infty \text{ м}.$$

Кривая $\mu = 3/4$.

Полученная кривая отличается от стандартной зависимости на отрезке [3-7] не более чем на 2 %, что указывает на их практическое совпадение.

На основании вышеизложенного материала можно утверждать, что результаты моделирования можно использовать для разработки стенда так как погрешность при измерении не превышает 2,3%, а погрешность при построении кривой 2%, что является достаточным условием для практического применения.

3.2 Моделирование метода «Амперметра – вольтметра» для измерения сопротивления заземляющего устройства

Для моделирования метода «Амперметра – Вольтметра» предназначенного для измерения сопротивления заземления подстанции были приняты параметры заземляющего устройства ПС 220кВ “Минусинская опорная”. Длина заземляющего устройства составила 300м, а ширина 265м, при этом диагональ подстанции равна 400м. При моделировании разностокового электрода осуществлялся на расстояние $L = 3D = 1200\text{м}$, потенциальный электрод перемещался с шагом $0,1L$.

При моделировании метода «Амперметра – Вольтметра» для измерения сопротивления заземляющего устройства подстанции, величина тока генератора была принята 400 мА. Это позволило получить более точные данные при измерении напряжения между электродами, при этом сопротивление для каждого измерения соответствовало значениям, приведенным в таблице 3.2.

Схема моделирования метода «Амперметра – Вольтметра» для измерения сопротивления заземления подстанции приведена на рис.3.3.

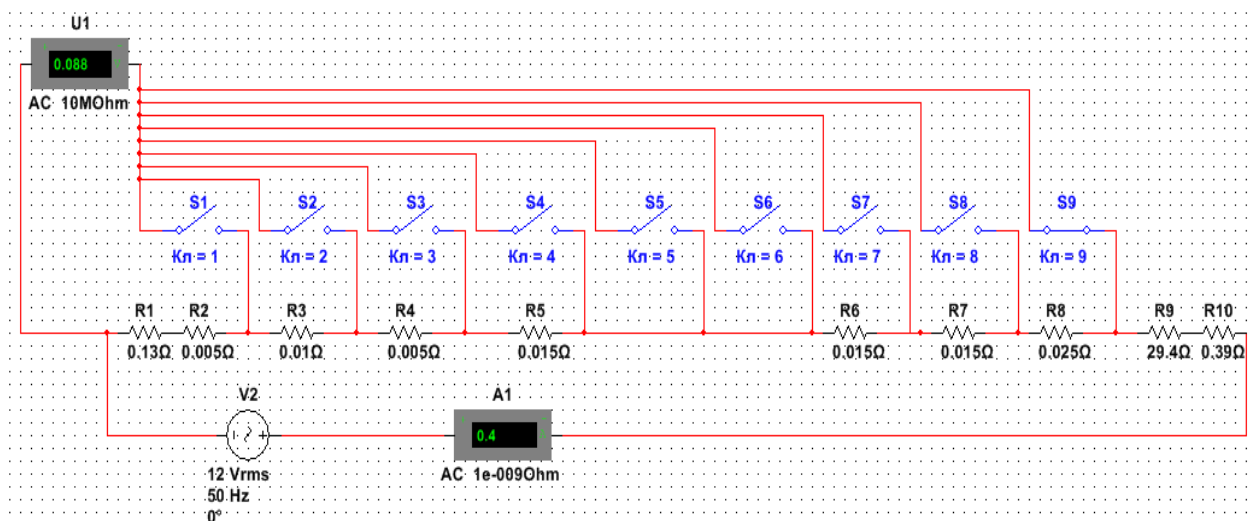


Рисунок 3.3 – Схема моделирования метода «Амперметра – Вольтметра» для измерения сопротивления заземления подстанции

Разнос электродов для измерения напряжения при моделировании был произведен с помощью ключей S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, тем самым позволив переставлять электрод в нужное нам место. В результате было смоделировано 9 точек измерения, результаты измерения приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 Результаты моделирования метода «Амперметра – Вольтметра» для измерения сопротивления заземления подстанции

$L_{пэ}/L_{тэ}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
I, A	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$U_{изм.}, В$	0,054	0,058	0,06	0,066	0,066	0,066	0,072	0,078	0,88
R, Ом	0,135	0,145	0,150	0,165	0,165	0,165	0,18	0,195	0,22

Строим зависимость $R = f(L_{пэ}/L_{тэ})$, полученная зависимость показана на рисунке 3.4

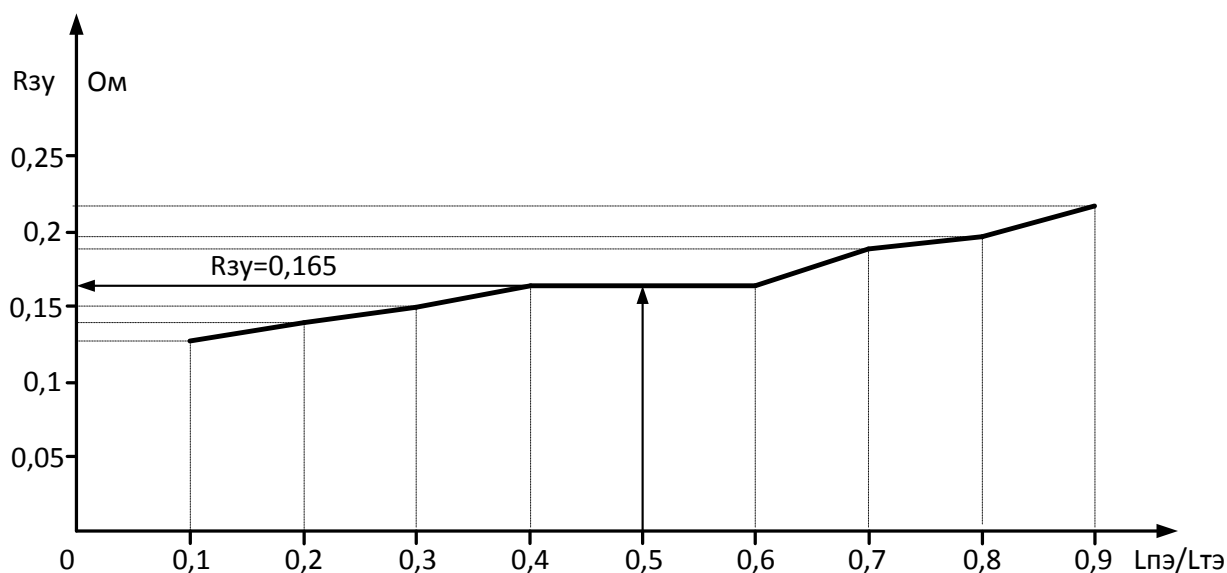


Рисунок 3.4 - Зависимость $R = f(L_{пэ}/L_{тэ})$

Погрешность определяется по формуле:

$$\Delta, \% = \frac{U_{изм.} - U_{мод.}}{U_{изм.}} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Значения относительной погрешности при моделировании метода «Амперметра – Вольтметра» для измерения сопротивления заземления подстанции приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6 Результаты погрешностей моделирования методом “амперметра - вольтметра”

№ измерения	Реальные измерения $U_{изм.}, В$	Значения моделирования $U, В$	Погрешность $\Delta, \%$
1	0,054	0,054	0
2	0,058	0,058	0
3	0,062	0,06	3
4	0,066	0,066	0
5	0,066	0,066	0
6	0,066	0,066	0
7	0,072	0,072	0
8	0,078	0,078	0
9	0,088	0,088	0

Анализ данных табл. 3.6 показывает, что результаты моделирования можно использовать для разработки стенда, так как погрешность не превышает 3%, что является достаточным условием для практического применения.

3.3 Выводы по третьему разделу

На основании выше изложенного можно делать следующие выводы:

- 1) Результаты моделирования параметров земли и заземляющего устройства практически совпали с реальными значениями, так как максимальная погрешность не превышала 3%, что является достаточным для практического использования полученных при моделировании данных.
- 2) Схемы моделирования и их параметры принимаем как основу для разработки стенда по измерению электропроводности грунта и сопротивлению заземления.

4 Разработка конструкции стенда, монтаж, наладка и апробация работы стенда

4.1 Разработка дизайна и конструкции стенда

Габариты стенда были приняты исходя из существующих стендов, которые используются в лабораториях на кафедре ЭГМП. Габариты стенда представлены на рисунке 4.1.

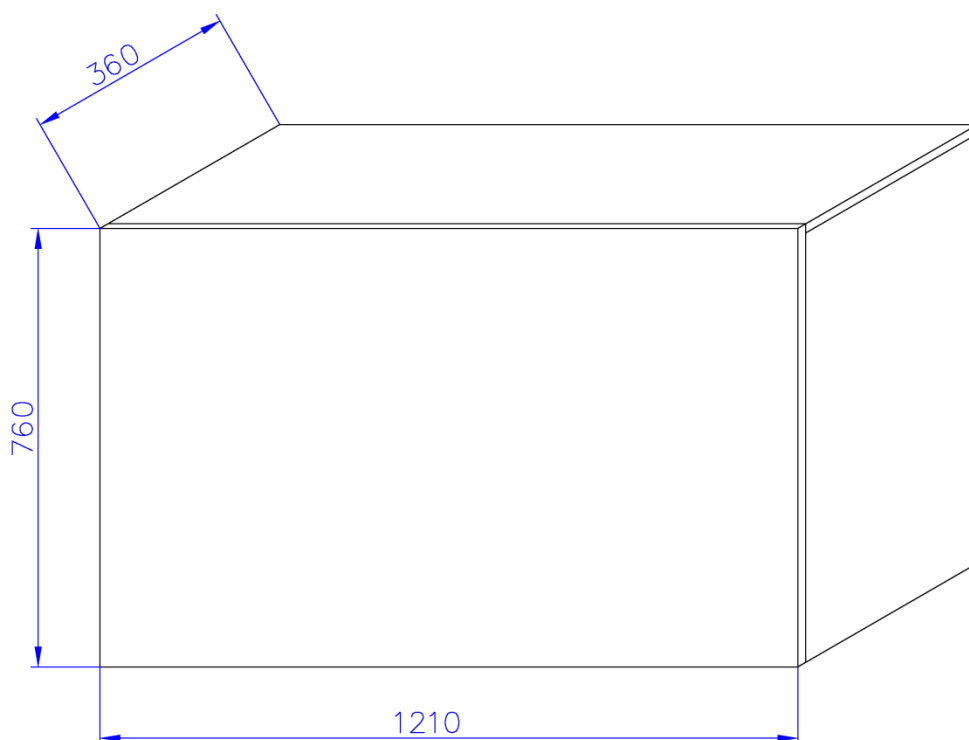


Рисунок 4.1 – Габариты лабораторного стенда

Корпус лабораторного стенда собран из листов ЛДСП белого цвета толщиной 16 мм, скрепленных шурупами. Внешний вид корпуса стенда представлен на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – Внешний вид корпуса лабораторного стенда

На рисунке 4.3 представлен эскиз лицевой части стенда.

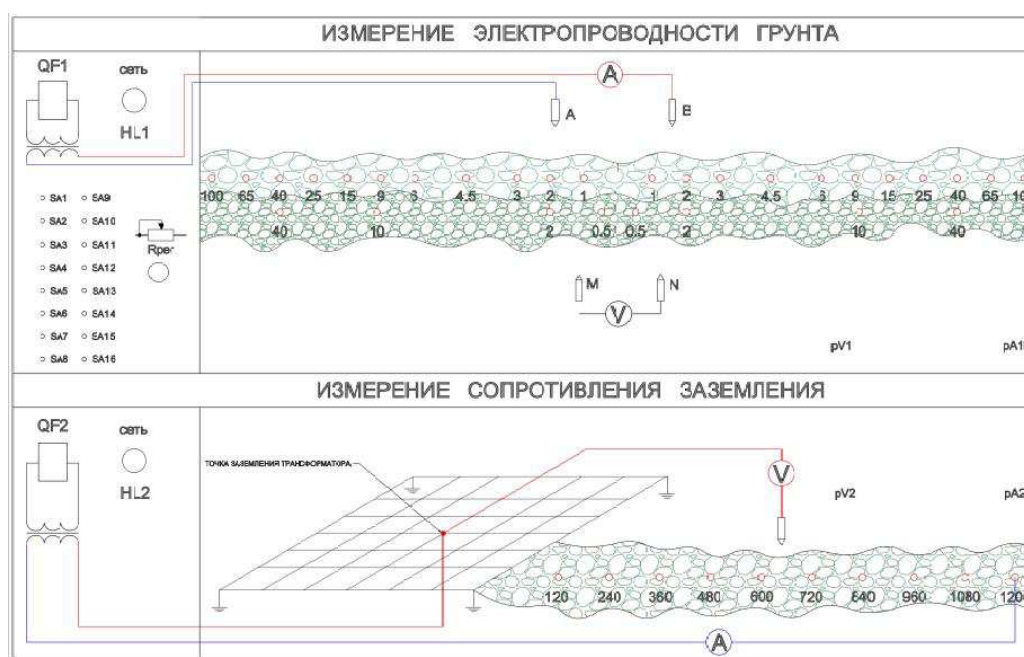


Рисунок 4.3 – Эскиз лицевой части стенда

Эскиз лицевой части был напечатан на самоклеящейся бумаге, а все необходимые элементы установлены на места, согласно эскизу, на рисунке 4.3. На рисунке 4.4 приведена фотография внешнего вида лабораторного стенда – измерение электропроводности грунта и измерение сопротивления заземления.

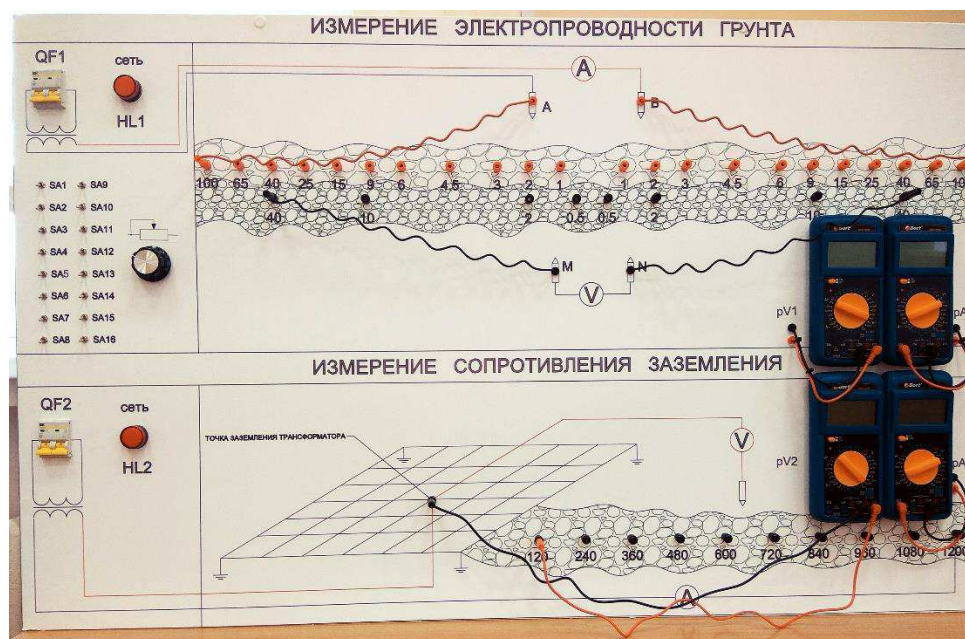


Рисунок 4.4 – Внешний вид лабораторного стенда – измерение электропроводности грунта и измерение сопротивления заземления

Для подачи напряжения на схемы стенда по измерению электропроводности грунта и сопротивления заземления используются автоматические выключатели QF1 и QF2, при включении которых загораются красные лампочки HL1 и HL2 соответственно. Лицевая часть стенда разбита на два поля, в верхней части стенда изображена двухслойная модель грунта с указанием токовых АВ и потенциальных MN электродов. Тумблеры SA1-SA16 предназначены для моделирования точек измерения. Резистор $R_{\text{рег}}$ предназначен для регулировки (настройки) токов в цепи генератора равным 400 мА для каждой точки измерения. В правой нижней части показаны измерительные приборы.

В нижней части стенда представлена условная схема заземляющего устройства подстанции с диагональю равной 400 м и точками измерения. Токовый электрод устанавливается на расстоянии $L = 3D = 1200$ м. Потенциальный электрод перемещается с шагом $0,1L$, то есть на расстоянии 120, 240, 360, 480, 600, 720, 840, 960, 1080 м. Значение тока и напряжения измеряется с помощью мультитестеров.

4.2 Выбор рабочего напряжения и автоматического выключателя

Для безопасного функционирования лабораторного стенда принимаем рабочее напряжения схемы 12В.

Электрические параметры схемы стенда, приведенные в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Электрические параметры схемы стенда

Название стенда	Напряжение сети, В	Рабочее напряжение, В	Номинальный ток схемы, I_n , А	Номинальная мощность P_n , Вт	Коэффициент мощности, φ
Измерение электропроводности грунта	220	12	0,4	4,8	1
Измерение сопротивления заземления	220	12	0,4	4,8	1

Для защиты оборудования, питающегося от напряжения 220 В, от токов КЗ принимаем автоматический выключатель ВА 47-29. Параметры автоматического выключателя приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры выключателя

Тип выключателя	Номинальное напряжение U_n , В	Номинальный ток расцепителя $I_{н.расц.}$, А	Номинальная отключающая способность $I_{сп.}$, кА
IEK ВА 47-29 С2	220	2	4,5

Ток двухфазного короткого замыкания в месте установки стенда по данным энергетической службы СФУ не превышает 2.2кА. Выключатели считаются работоспособным, если $U_{н.выкл.} = U_{н.сети}$, $I_{н.расц.} \geq 1,15I_{н.эл.пр.}$. Отключающая способность выключателя должна быть $I_{откл.н.} \geq I_{кз.макс.}$.

В таблице 4.3 приведены сравнительные характеристики выключателя с параметрами схемы стенда.

Таблица 4.3 – Сравнительные характеристики выключателя

Параметр	Выключатель IEK ВА 47-29 С2	Схема 1	Схема 2	Выполнение условия
U_n , В	220	220/12	220/12	Соблюдается
$I_{н.расц}$, А	2	0,4	0,4	Соблюдается
$I_{отк.сп.}$, кА	4,5	2,2	2,2	Соблюдается

Анализ таблицы 4.3 показывает, что выбранный выключатель обеспечит надежную работу схемы, а при возникновении короткого замыкания успешно отключат соответствующую схему от сети.

4.3 Разработка принципиальных электрических и монтажных схем стенда

Результаты моделирования, приведенные в третьем разделе, показали хорошее совпадение практических результатов с результатами моделирования, поэтому в качестве принципиальных электрических схем по измерению электропроводности грунта и сопротивлению заземления были приняты параметры схем моделирования.

Принципиальные электрические схемы для измерения электропроводности грунта приведена на рис. 4.6, а схема для измерения заземляющего устройства показана на рис. 4.5. На основании принципиальных электрических схем была разработана монтажная схема стенда, показана на рис. 4.7.

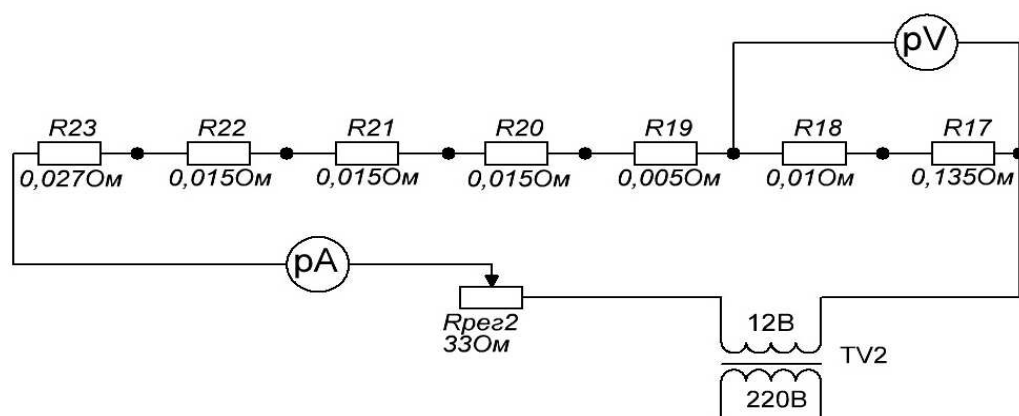


Рисунок 4.5 – Принципиальная схема для измерения заземляющего устройства

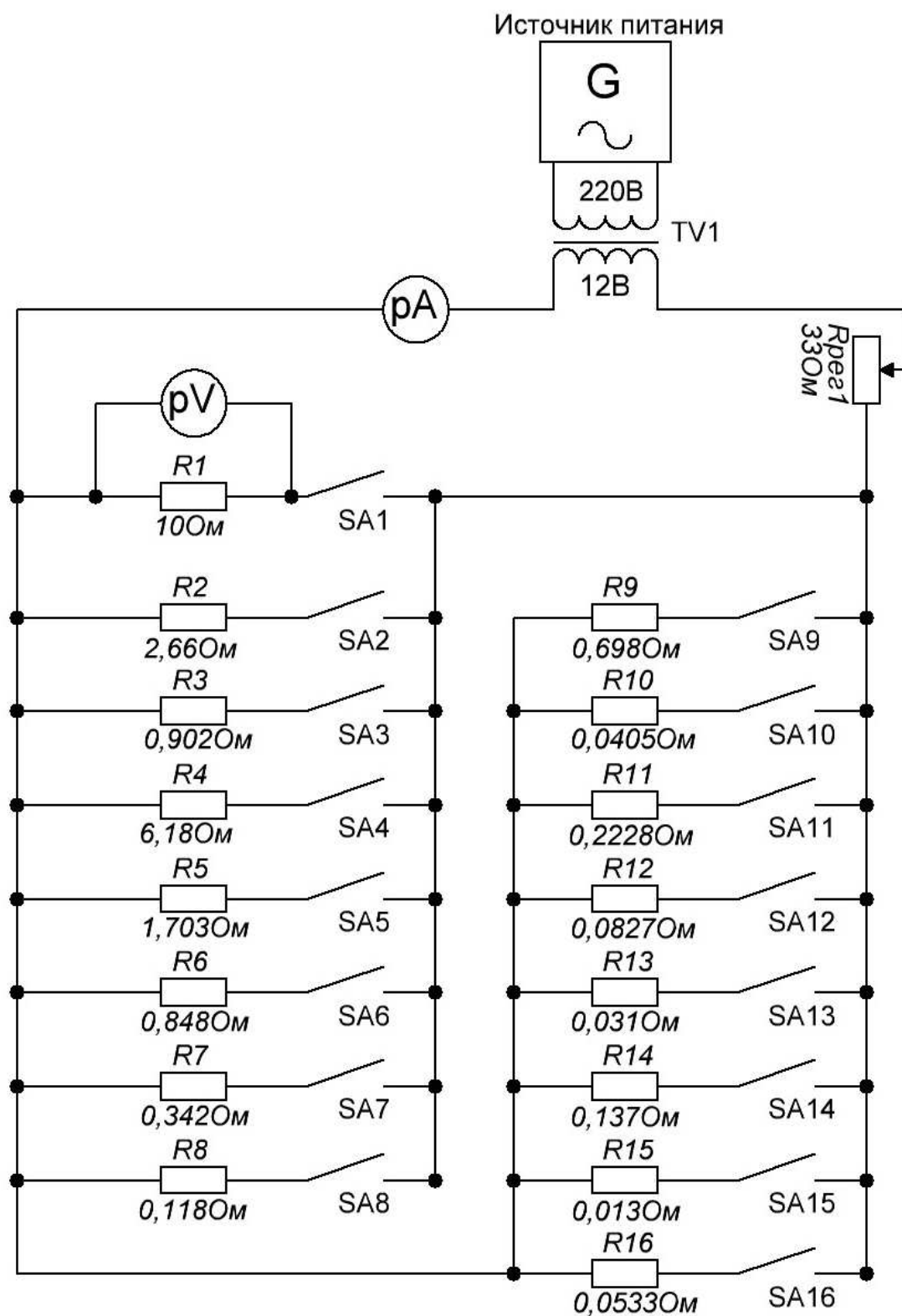


Рисунок 4.6 – Принципиальная электрическая схема для измерения электропроводности грунта

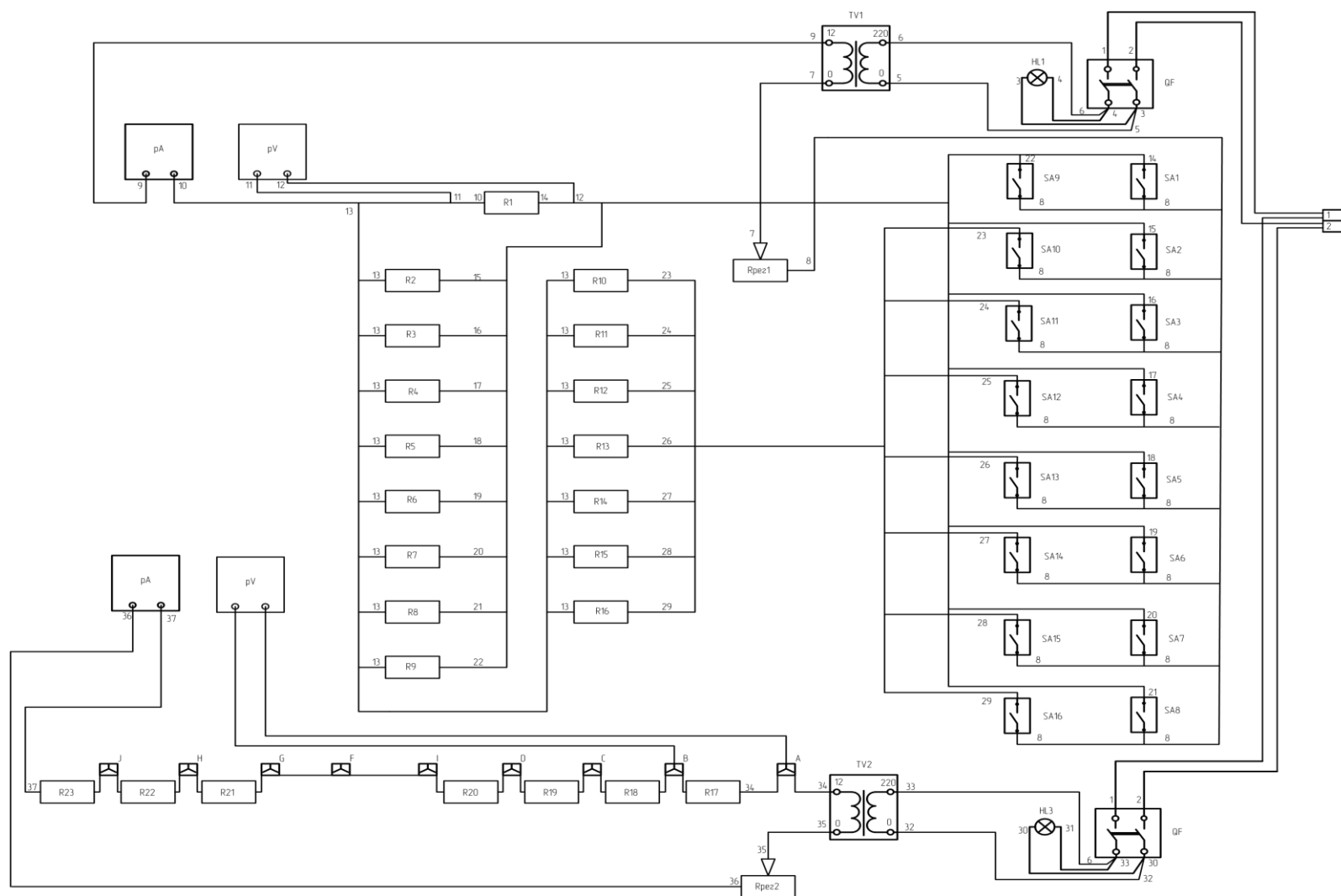


Рисунок 4.7 – Монтажная схема стенда

4.4 Выбор необходимых измерительных приборов и оборудования

Амперметр и вольтметр выбран исходя из теоретических значений силы тока и величины напряжения в цепях измерения, полученных в ходе моделирования в среде Multisim 12.0. Принимаем цифровой мультитестер Bort BMM-1000N с диапазоном измерения переменного тока 0-20А, диапазоном измерения переменного напряжения 0-750В. Внешний вид прибора представлен на рис.4.6



Рисунок 4.6 – Внешний вид мультитестера

Технические характеристики прибора Bort BMM-1000N приведены в таблицах 4.4-4.6

Таблица 4.4 – Технические характеристики Bort BMM-1000N

Технические характеристики	Параметры
Напряжение постоянного тока	0 - 1000 В
Напряжение переменного тока	0 – 750 В
Постоянный ток	0 – 20 А
Переменный ток	0 – 20 А
Сопротивление	0 – 20 Мом
Емкость	0 – 200 мкФ
Масса	0,3 кг

Таблица 4.5 – Измерение напряжения в цепи переменного тока (V AC)

Режим	Единица измерения	Погрешность
2 В	1 мВ	$\pm 0,8\%$ ед. изм ± 3 значения
20 В	10 мВ	$\pm 0,8\%$ ед. изм ± 3 значения
200 В	100 мВ	$\pm 0,8\%$ ед. изм ± 3 значения
750 В	1 В	$\pm 1,2\%$ ед. изм ± 3 значения

Таблица 4.6 – Измерение силы тока в цепи переменного тока (A AC)

Режим	Единица измерения	Погрешность
2 мА	1 μ А	$\pm 1,2\%$ ед. изм ± 3 значения
20 мА	10 μ А	$\pm 1,2\%$ ед. изм ± 3 значения
200 мА	100 μ А	$\pm 1,8\%$ ед. изм ± 3 значения
20 А	10 мА	$\pm 3\%$ ед. изм ± 3 значения

Спецификация приборов, устройств, комплектующих и расходных материалов, которые использовались при конструировании стенда представлена в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Спецификация электрооборудования

Обозначение	Наименование	Тип или марка	Кол-во
QF1	Автоматический выключатель	ВА47-29 2А IEK	2
HLG1	Индикаторная лампа 220 В		2
pA, pV	Мультитестер	Bort BMM-1000N	4
SA1 – SA16	Тумблеры 2 позиц.	MTS-1	16
$R_{\text{рег}}$	ППБ-50Г 9108	проволочно регулируемое	2
TV	Трансформатор 220/12В	LS-A8594-PT-A	2
	Соединительные провода	ПВ-1 1,5мм ²	40
	Штепсельные разъемы		41
	Клеммная колодка	КЗВ	2

В таблице 4.8 приведены значения сопротивлений схем, а также марка резистора или тип материала и из которого он изготовлен.

Таблица 4.8 – Спецификация сопротивлений схем

Обозначение	Величина сопротивления	Тип или марка	Кол-во
R_1	10	Керамический	1
R_2	2,66	Нихром d=1,4мм	1
R_3	0,902	Нихром d=1,4мм	1
R_4	6,18	Керамический	1
R_5	1,703	Керамический	1
R_6	0,848	Нихром d=1,4мм	1
R_7	0,342	Нихром d=1,4мм	1
R_8	0,118	Нихром d=1,4мм	1
R_9	0,699	Нихром d=1,4мм	1
R_{10}	0,0405	Нихром d=1,4мм	1
R_{11}	0,223	Нихром d=1,4мм	1
R_{12}	0,0827	Нихром d=1,4мм	1
R_{13}	0,031	Нихром d=1,4мм	1
R_{14}	0,137	Нихром d=1,4мм	1
R_{15}	0,013	Нихром d=1,4мм	1
R_{16}	0,053	Нихром d=1,4мм	1
R_{17}	0,135	Нихром d=1,4мм	1
R_{18}	0,01	Нихром d=1,4мм	1
R_{19}	0,05	Нихром d=1,4мм	1
R_{20-22}	0,015	Нихром d=1,4мм	3
R_{23}	0,025	Нихром d=1,4мм	1

4.5 Аprobация реальной схемы стенда

4.5.1 Алгоритм измерения и расчета электропроводности грунта методом ВЭЗ

Алгоритм измерения и расчета электропроводности грунта методом ВЭЗ выполняется в следующей последовательности.

1) Подаем напряжение на схему. Включаем автоматический выключатель QF1, загорается красная сигнальная лампа HL1, которая указывает, что напряжение на схему подана.

2) Подготавливаем приборы для измерения электрических величин. На амперметре в качестве которого выступает мультитестер Bort BMM-1000N, выставляем предел по переменному току (\sim) 20А, а на вольтметре предел переменного напряжения (\sim) 20В.

3) Для определения электропроводности грунта разносим токовые электроды (AB) на расстояние 1м (позиция 1-1), а потенциальные электроды (MN) на расстояние 0,5м (позиция 0,5-0,5), что соответствует первому пункту таблицы 4.9. Далее включаем тумблер SA1 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4 А. Фиксируем значения напряжения между электродами MN. Заносим результаты измерений тока и напряжения в таблицу 4.9.

4) Тумблер SA1 остается включенным для каждого опыта, указанного в таблице 4.9.

5) Разносим токовые электроды AB на расстояние 2 метра (позиция 2-2), а потенциальные электроды MN остаются в прежнем положении, что соответствует второму пункту таблицы 4.9. Включаем тумблер SA2 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре выставляем предел переменного напряжения (\sim) 2В и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN. Полученные

значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 4.9. Выключаем тумблер SA2.

6) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 3 метра (позиция 3-3), а потенциальные электроды MN остаются в прежнем положении, что соответствует третьему пункту таблицы 4.9. Включаем тумблер SA3 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 2В и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 4.9. Выключаем тумблер SA3.

7) Токовые электроды АВ остаются в прежнем положении, а потенциальные электроды MN разносим на расстояние 2 м (позиция 2-2), что соответствует четвертому пункту таблицы 4.9. Включаем тумблер SA4 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 2В и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 4.9. Выключаем тумблер SA4.

8) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 4,5 метра (позиция 4,5-4,5), а потенциальные электроды MN остаются в прежнем положении, что соответствует пятому пункту таблицы 4.9. Включаем тумблер SA5 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения 2В и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 4.9. Выключаем тумблер SA5.

9) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 6 метра (позиция 6-6), а потенциальные электроды MN остаются в прежнем положении, что соответствует шестому пункту таблицы 4.9. Включаем тумблер SA6 и

настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 2В и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 4.9. Выключаем тумблер SA6.

10) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 9 метра (позиция 9-9), а потенциальные электроды MN остаются в прежнем положении, что соответствует седьмому пункту таблицы 4.9. Включаем тумблер SA7 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 2В и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 4.9. Выключаем тумблер SA7.

10) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 15 метра (позиция 15-15), а потенциальные электроды MN остаются в прежнем положении, что соответствует восьмому пункту таблицы 4.9. Включаем тумблер SA8 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 2В и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 4.9. Выключаем тумблер SA8.

11) Токовые электроды АВ остаются в прежнем положении, а потенциальные электроды MN разносим на расстояние 10 м (позиция 10-10), что соответствует девятому пункту таблицы 4.9. Включаем тумблер SA9 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре выставляем предел переменного напряжения (~) 2В и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN. Полученные

значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 4.9. Выключаем тумблер SA9.

12) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 25 метра (позиция 25-25), а потенциальные электроды MN разносим на расстояние 2 м (позиция 2-2), что соответствует десятому пункту таблицы 4.9. Включаем тумблер SA10 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре выставляем предел переменного напряжения (~) 200мВ и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 4.9. Выключаем тумблер SA10.

13) Токовые электроды АВ остаются в прежнем положении, а потенциальные электроды MN разносим на расстояние 10 м (позиция 10-10), что соответствует одиннадцатому пункту таблицы 4.9. Включаем тумблер SA11 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре выставляем предел переменного напряжения (~) 200мВ и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 4.9. Выключаем тумблер SA11.

14) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 40 метра (позиция 40-40), а потенциальные электроды MN остаются в прежнем положении, что соответствует двенадцатому пункту таблицы 4.9. Включаем тумблер SA12 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 200мВ и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 4.9. Выключаем тумблер SA12.

15) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 65 метра (позиция 65-65), а потенциальные электроды MN остаются в прежнем положении, что

соответствует тринадцатому пункту таблицы 4.9. Включаем тумблер SA13 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 200мВ и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 4.9. Выключаем тумблер SA13.

16) Токовые электроды АВ остаются в прежнем положении, а потенциальные электроды MN разносим на расстояние 40 м (позиция 40-40), что соответствует четырнадцатому пункту таблицы 4.9. Включаем тумблер SA14 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 200мВ и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 4.9. Выключаем тумблер SA14.

17) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 100 метра (позиция 100-100), а потенциальные электроды MN разносим на расстояние 10 м (позиция 10-10), что соответствует пятнадцатому пункту таблицы 4.9. Включаем тумблер SA15 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 200мВ и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 4.9. Выключаем тумблер SA15

18) Токовые электроды АВ остаются в прежнем положении, а потенциальные электроды MN разносим на расстояние 40 м (позиция 40-40), что соответствует шестнадцатому пункту таблицы 4.9. Включаем тумблер SA16 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 200мВ и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN, Полученные

значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 4.9. Выключаем тумблер SA16.

19) Для каждого пункта таблицы 4.9 рассчитываем кажущиеся сопротивление по формуле:

$$R_{\text{каж}} = \frac{U}{I}, \quad (4.1)$$

и кажущееся удельное электрическое сопротивление грунта определяем по выражению:

$$\rho_{\text{каж}} = R_{\text{каж}} \cdot k \quad (4.2)$$

Записываем рассчитанные значения в соответствующие столбцы таблицы 4.9.

Таблица 4.9 Результаты измерений для определения характеристик электрической структуры грунта по методу ВЭЗ.

№ измерения	AB/2, м	MN, м	k, м	I, мА	U, мВ	$R_{\text{каж}} = U/I$	$\rho_{\text{каж}}, \text{ Ом} \cdot \text{м}$
1	1	0,5	5,890	400	4,08	10,2	60,078
2	2	0,5	24,74	400	0,844	2,11	52,2
3	3	0,5	56,16	400	0,355	0,887	49,8
4	3	2	12,57	400	1,539	3,84	48,4
5	4,5	2	30,24	400	0,586	1,465	44,3
6	6,0	2	54,98	400	0,311	0,7775	42,7
7	9,0	2	125,7	400	0,133	0,3325	41,79
8	15	2	351,9	400	0,046	0,115	40,46
9	15	10	62,83	400	0,258	0,6450	40,52
10	25	2	980,2	400	0,0166	0,0415	40,68
11	25	10	188,5	400	0,0879	0,2197	41,42
12	40	10	494,8	400	0,0328	0,082	40,57
13	65	10	1319	400	0,0123	0,0307	40,56
14	65	40	300,4	400	0,535	0,13375	40,18
15	100	10	3134	400	0,0089	0,02225	69,7
16	100	40	754,0	400	0,212	0,053	40

20) По данным таблицы 4.9 строим зависимость $\rho_{\text{каж}} = f(L_{AB})$ в биологориформических координатах. Кривая приведена на рисунке 4.7

21) Сравниваем полученную зависимость со стандартными кривыми, показанную на рисунке 2.11. Экспериментальная кривая практически совпала со стандартной кривой с коэффициентом $\mu = 3/4$. Согласно теории ВЭЗ допускается отклонение от стандартной кривой не более 3х точек. В нашем случае наблюдается отклонение одной точки, это еще раз подтверждает практическое совпадение экспериментальной кривой со стандартной.

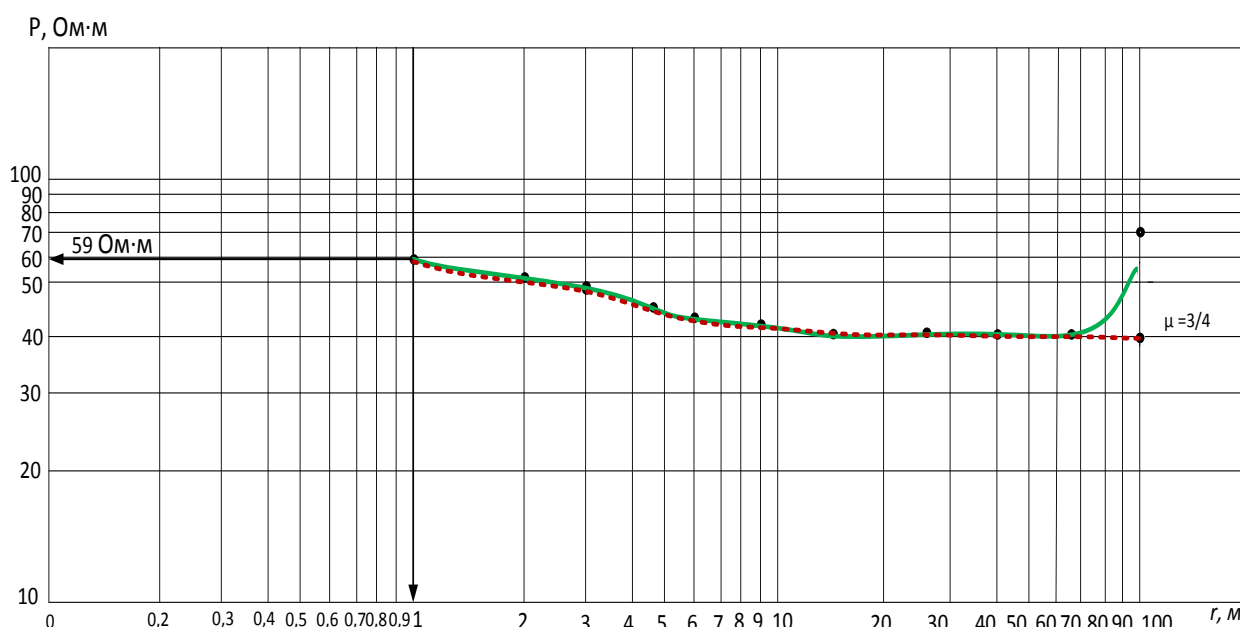


Рисунок 4.7 – Зависимость $\rho_{\text{каж}} = f(L_{AB})$, рассчитанная по методу ВЭЗ

22) Вертикальная ось в начале кривой на оси абсцисс указывает толщину верхнего слоя грунта $h_1 = 1,0\text{м}$. Горизонтальная ось проходящая через начало кривой по оси ординат указывает удельное эклектрическое сопротивление первого слоя грунта $\rho_1 = 59\text{ Ом}\cdot\text{м}$

23) Рассчитываем удельное электрическое сопротивление нижнего слоя грунта по формуле

$$\rho_2 = \mu \cdot \rho_1 = \frac{3}{4} \cdot 59 = 44 \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (4.3)$$

Таким образом получаем двухслойную модель грунта в районе подстанции со следующими параметрами:

$$\rho_1 = 59 \text{ Ом} \cdot \text{м}; h_1 = 1,0 \text{ м}$$

$$\rho_2 = 44 \text{ Ом} \cdot \text{м}; h_2 = \infty$$

Значения параметров земли, полученные на лабораторном стенде и в процессе моделирования, практически совпадают. Это подтверждает, что первая цель дипломной работы достигнута.

4.5.2 Алгоритм оценки сопротивления заземления подстанции

Алгоритм оценки сопротивления заземления подстанции состоит из двух этапов.

На первом этапе рассмотрим последовательность измерения сопротивлений заземления методом «Амперметра – вольтметра»

1.1) Подаем напряжение на схему. Включаем автоматический выключатель QF2, загорается красная сигнальная лампа HL2, которая указывает, что напряжение на схему подано.

1.2) Подготавливаем приборы для измерения электрических величин. На амперметре в качестве которого выступает мультитестер Bort BMM-1000N, выставляем предел по переменному току (~) 20А, а на вольтметре предел переменного напряжения (~) 200В.

1.3) Токовый электрод устанавливаем на расстоянии 1200м.

1.4) Один зажим вольтметра соединяем с заземляющим устройством подстанции (центральная точка ЗУ)

1.5) Первое измерение – потенциальный электрод (второй зажим вольтметра) устанавливаем на расстоянии 120м от подстанции. Фиксируем ток и напряжение по приборам. Результаты измерений заносим в таблицу 4.10.

1.6) Второе измерение – устанавливаем потенциальный электрод на расстоянии 240 м. Фиксирует ток и напряжение по приборам, полученные результаты заносим в таблицу 4.10.

1.7) Третье измерение – устанавливаем потенциальный электрод на расстоянии 360 м. Фиксирует ток и напряжение по приборам, полученные результаты заносим в таблицу 4.10.

1.8) Четвертое измерение – устанавливаем потенциальный электрод на расстоянии 480 м. Фиксирует ток и напряжение по приборам, полученные результаты заносим в таблицу 4.10.

1.9) Пятое измерение – устанавливаем потенциальный электрод на расстоянии 600 м. Фиксирует ток и напряжение по приборам, полученные результаты заносим в таблицу 4.10.

1.10) Шестое измерение – устанавливаем потенциальный электрод на расстоянии 720 м. Фиксирует ток и напряжение по приборам, полученные результаты заносим в таблицу 4.10.

1.11) Седьмое измерение – устанавливаем потенциальный электрод на расстоянии 840 м. Фиксирует ток и напряжение по приборам, полученные результаты заносим в таблицу 4.10.

1.12) Восьмое измерение – устанавливаем потенциальный электрод на расстоянии 960 м. Фиксирует ток и напряжение по приборам, полученные результаты заносим в таблицу 4.10.

1.13) Девятое измерение – устанавливаем потенциальный электрод на расстоянии 1080 м. Фиксирует ток и напряжение по приборам, полученные результаты заносим в таблицу 4.10.

1.14) На основе полученных данных для каждого местоположения потенциального электрода рассчитываем сопротивления по закону Ома. Результаты расчетов заносим в таблицу 4.10

Таблица 4.10 Результаты измерений схемы стенда для определения сопротивления заземления

$L_{ПЭ}/L_{ТЭ}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
I, A	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$U_{изм.}, B$	0,0397	0,0443	0,0613	0,0681	0,0684	0,0684	0,0754	0,0814	0,0907
$R, Ом$	0,095	0,111	0,153	0,171	0,171	0,171	0,189	0,204	0,227

15) Строим зависимость $R = f(L_{ПЭ}/L_{ТЭ})$, полученная зависимость показана на рис.4.8

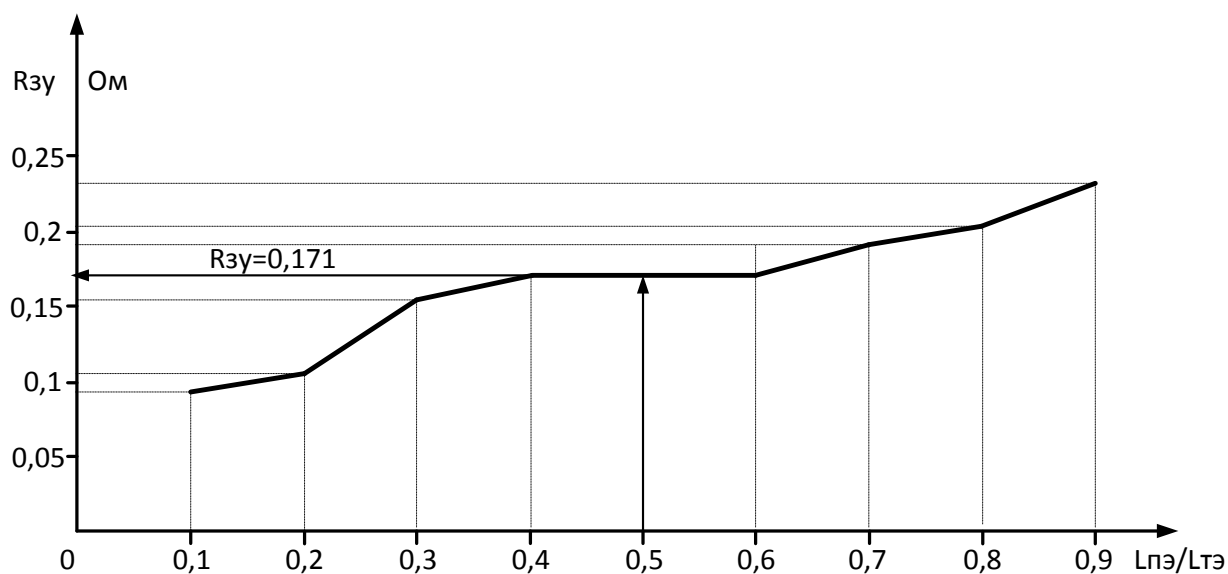


Рисунок 4.8 - Зависимость $R = f(L_{ПЭ}/L_{ТЭ})$

На полученной зависимости находим пологий участок, середина данного участка показывает сопротивление заземляющего устройства. В нашем случае на полученной зависимости имеется пологий участок в диапазоне 0,4-0,6. Из середины этого участка проводим прямую параллельную оси абсцисс. Пересечение данной прямой с осью ординат укажет на величину сопротивления заземления подстанции: $R_{3y}=0,171 \text{ Ом}$.

Полученное значения сопротивления заземления при выполнении лабораторной работы совпадает с реальным значением сопротивления ПС 220кВ «Минусинская опорная» измеренная в летнее время года. Это указывает на то, что вторая цель дипломной работы достигнута.

На втором этапе выполнения работы рассчитываем сопротивления заземляющего устройства расчетным методом.

2.1) Определяем сопротивление заземления подстанции расчетным методом по формулам приведенным во втором разделе настоящей работы, с учетом коэффициента эксплуатации.

2.2) Исходными данными для расчета коэффициента эксплуатации приняты следующие данные:

- максимальное значение однофазного тока КЗ на шинах 110 кВ ПС220 кВ «Минусинская опорная» составляет 4,45 кА;
- грозовая активность в районе расположения подстанции не превышает 40 ч в год;
- срок эксплуатации подстанции более 12 лет;
- периодичность проверки ЗУ составляет 6 лет.

Следовательно, примем следующие значения коэффициентов $K_K = 1,1$; $K_M = 1,02$; $K_{П} = 1,05$; $K_{Г} = 1,02$; $K_{КЗ} = 1,05$.

Значение коэффициента эксплуатации для существующего ЗУ будет равно:

$$K_{\text{Э}} = K_K \cdot K_M \cdot K_{\text{П}} \cdot K_{\Gamma} \cdot K_{\text{КЗ}}$$

$$K_{\text{Э}} = 1,1 \cdot 1,02 \cdot 1,05 \cdot 1,02 \cdot 1,05 = 1,26$$

2.3) Исходные данные для расчета сопротивления растеканию тока с существующего ЗУ $R_{\text{ср}}$ следующие:

глубина погружения в землю верхнего конца вертикального электрода - 0,5м;

длина вертикального электрода – 0.5м;

суммарная длина горизонтальных заземлителей – 688м;

расстояние между горизонтальными заземлителями 5м;

количество вертикальных электродов 8 штук;

площадь заземляющего устройства составляет 79500 м².

2.4) Определяем эквивалентное удельное сопротивление грунта:

$$k = 0,43 \cdot \left(l_{\text{отн}} + 0,272 \cdot \ln \frac{a \cdot \sqrt{2}}{l_{\text{Б}}} \right), \quad (4.3)$$

$$l_{\text{отн}} = \frac{h_1 - t_{\text{Б}}}{l_{\text{Б}}} = \frac{1 - 0,50}{3} = 0,166 \text{ м.} \quad (4.4)$$

тогда по формулам 4.3 и 4.4

$$k = 0,43 \cdot \left(0,166 + 0,272 \cdot \ln \frac{5 \cdot \sqrt{2}}{3} \right) = 0,172, \quad (4.5)$$

$$\rho_{\text{э}} = \rho_2 \cdot \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^k = 44 \cdot \left(\frac{59}{44} \right)^{0,172} = 46,3 \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (4.6)$$

2.5) Рассчитываем $R_{\text{ср}}$

$$R_{\text{ср}} = A \frac{\rho_{\text{э}}}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_{\text{э}}}{L_{\Gamma} + n \cdot l_{\text{Б}}}, \quad (4.7)$$

$$t_{\text{отн}} = \frac{(l_{\text{Б}} + t_{\text{Б}})}{\sqrt{S}} = \frac{(3 + 0,5)}{\sqrt{79500}} = \frac{3,5}{281,96} = 0,0124, \quad (4.8)$$

$$A = 0,444 - (0,84 \cdot t_{\text{отн}}) = 0,444 - (0,84 \cdot 0,0124) = 0,433, \quad (4.9)$$

$$R_{\text{ср}} = 0,433 \cdot \frac{46,3}{281,96} + \frac{46,3}{688 + (8 \cdot 3)} = 0,136. \quad (4.10)$$

2.6) Определим $R_{\text{зy}}$

$$R_{3y} = k_{\text{э}} \cdot R_{\text{ср}} = 1,26 \cdot 0,136 = 0,171 \text{ Ом.} \quad (4.11)$$

2.7) Сопоставим экспериментальные и расчетные значения сопротивления заземляющего устройства.

4.6 выводы по четвертому разделу

На основании вышеизложенного можно сделать следующие основные выводы по разделу:

1. Электрическая схема стенда практически соответствует принципиальной схеме, полученной при виртуальном моделировании.
2. Параметры схемы, выбранное оборудование и измерительные приборы позволяют получить точные данные, которые совпадают с расчетными значениями. Это указывает то, что схема стенда максимально отражает реальные условия эксплуатации ЗУ подстанции.
3. На основании апробации работы стенда необходимо разработать методическое обеспечение к данной лабораторной работе.

5 Разработка методического обеспечения по выполнению лабораторной работы «Оценка электрических параметров земли»

Методическое обеспечение включает в себя два основных раздела:

- 1) методические указания к лабораторным работам;
- 2) возможные варианты выполнения лабораторной работы с исходными данными и полученными результатами.

Методические указания предназначены для студентов и отражают последовательность выполнения лабораторных работ в зависимости от вариантов, которые выдает преподаватель.

Исходные данные с полученными результатами для каждого варианта предназначены для преподавателя с целью проверки достоверности полученных результатов студентами.

5.1 Методические указания к лабораторной работе: «Оценка электрических параметров земли»



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

Сибирский Федеральный Университет

Институт горного дела, геологии и геотехнологий

«Оценка электрических параметров земли»

**Методические указания к
лабораторным работам для
студентов электротехнических
специальностей**

Красноярск 2018

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА, ГЕОЛОГИИ И ГЕОТЕХНОЛОГИИ

«Оценка электрических параметров земли»

**Методические указания к лабораторным
работам для студентов электротехнических
специальностей**

Красноярск 2018

5.1.1 Введение

Задачи, стоящие перед высшей школой на современном этапе, требуют повышения качества подготовки специалистов, усиления их практического обучения. Большая роль в совершенствовании учебного практического обучения в вузах принадлежит увеличению доли лабораторно-практических занятий в общем объеме изучаемых дисциплин. Эта форма обучения больше, чем любая другая, позволит обеспечить единство теории и практики.

Целью методических указаний является помощь студентам в поиске необходимой информации при изучении курса «Электромагнитная обстановка и электромагнитная совместимость на подстанции» и выполнении соответствующих лабораторных работ, что особенно важно в условиях имеющегося дефицита научно-технической литературы в данном направлении.

Содержание учебного пособия соответствует государственным образовательным стандартам и рабочим программам для студентов электротехнических специальностей вузов.

5.1.2 Техника безопасности при работах в лаборатории

Безопасность проведения и выполнения лабораторных работ является важнейшим условием учебного процесса. Несоблюдение правил техники безопасности и неосторожное обращение с электрическими аппаратами, схемами стендов лабораторных работ могут привести к тяжелым несчастным случаям.

Для предупреждения несчастных случаев все студенты, проводящие лабораторные работы, практические занятия или ведущие научно-исследовательские эксперименты в лаборатории и мастерской, должны знать и строго выполнять все требования по технике безопасности для каждого вида и рода работ, после инструктажа по технике безопасности они должны расписываться в специальном журнале.

Включение схемы под напряжение производится только с разрешения преподавателя или лаборанта и только после предупреждения об этом всех студентов, работающих на данном рабочем месте.

В случае короткого замыкания произойдет автоматическое срабатывание автоматического выключателя и стенд обесточится. При повреждении прибора в собранной схеме студент должен немедленно отключить пакетный выключатель на лицевой панели стенда и, **не делая попыток к исправлению, сообщить о повреждении преподавателю или лаборанту.**

В случае прекращения опыта или перерыва в работе схему надо обязательно отключить от сети.

Все изменения в соединениях (согласно программе проведения каждой лабораторной работы) должны производиться только при отключенном рабочем щите. После каждого изменения соединений – до включения напряжения – схема должна быть вновь проверена преподавателем или лаборантом.

Во время выполнения работы запрещается:

производить переключения в рабочей схеме, находящейся под напряжением;

прикасаться к оголенным токоведущим частям установок;

оставлять без наблюдения схему, находящуюся под напряжением;

включать не имеющие отношения к данной работе аппараты, приборы и рубильники.

Студенты должны бережно и аккуратно обращаться с аппаратурой, приборами и инструментами.

Во всех случаях обнаружения неисправного состояния оборудования, измерительных приборов и проводов **необходимо немедленно поставить в известность преподавателя.**

5.1.3 Общие указания по оформлению отчетов

Отчеты по выполненным работам оформляют с использованием персонального компьютера.

Схемы, таблицы и графики можно вычерчивать в карандаше, но обязательно с применением чертежных принадлежностей. Элементы схемы должны быть изображены по ГОСТу. Значения аргумента следует откладывать по горизонтальной оси, а значения функции – по вертикальной. Вдоль осей наносят масштабные шкалы, деления которых должны быть равномерными. Числовые значения следует указывать против соответствующих делений.

После нанесения экспериментально полученных точек на график, следует провести плавную линию, проходящую по возможности ближе к этим точкам.

При большом количестве кривых на одном графике рекомендуется изображать их штриховыми, штрихпунктирными или цветными линиями.

Следует избегать графиков, в которых деления в начале координат начинаются не с нулевого значения. Такие графики не дают представления о характере рассматриваемых зависимостей.

В конце каждой выполненной и оформленной работы должна стоять подпись студента.

Защита лабораторных работ осуществляется согласно графику, утвержденному преподавателем.

Конкретные указания по содержанию отчетов приводятся в конце описания каждой лабораторной работы.

5.1.4 Общие положения

Вторичное оборудование, системы связи, кабели вторичной коммутации на протяжении всего срока службы подвергаются электромагнитным воздействиям разного вида. Невыполнения условий ЭМС приводит к повреждению вторичного оборудования, неправильным действиям (отказам,

излишним или ложным срабатываниям) устройств РЗА, перекрытию изоляции кабелей вторичной коммутации и клемм шкафов вторичной коммутации, сбоев в работе автоматизированных рабочих мест персонала и т.д., существенно снижает надежность работы энергообъекта.

Критерием выполнения условий ЭМС является обеспечение электромагнитной обстановки, при которой наибольшие возможные уровни электромагнитных воздействий всех видов на объекте электросетевого хозяйства не превышают допустимых значений для каждого конкретного вторичного оборудования.

ЭМС вторичного оборудования и систем связи достигается при выполнении основных требований:

- применение вторичного оборудования с высоким уровнем помехозащищенности;
- применение первичного и вторичного оборудования с ограниченным уровнем эмиссии электромагнитных воздействий;
- выполнение комплекса организационных и технических мероприятий, обеспечивающих ограничение электромагнитных воздействий.

Каждое устройство испытывают на устойчивость к электромагнитным воздействиям. В технической документации на устройство производитель должен указывать уровень помехоустойчивости устройства, степень жесткости испытаний, а также уровень эмиссии электромагнитных воздействий. При аттестации оборудования, устанавливаемого на подстанциях, следует предъявлять требования по испытанию на помехоустойчивость и помехоэмиссию. Рекомендуемые степени жесткости испытаний и параметры испытательных воздействий для устройств вторичного оборудования и систем связи приведены в таблице 4.1.

Устойчивая и надежная работа вторичного оборудования и систем связи возможна только при условии создания на объекте ЭМО, при которой уровни электромагнитных воздействий всех видов не превышают допустимые для

каждого конкретного устройства значения при условии, что сопротивление ЗУ не превышает 0,5 Ом.

Сопротивление заземляющего устройства определяется конструкцией ЗУ и электропроводностью грунта, таким образом электропроводность грунта будет косвенно влиять на функционирование МПУ.

Таблица 5.1 – Виды испытаний на помехоустойчивость и помехоэмиссию вторичного оборудования и рекомендуемые степени жесткости.

№ п/п	Вид электромагнитных воздействий и испытаний на помехоустойчивость	Нормативный документ	Степень жесткости испытаний (тип соединения)	Параметр	Примечание
1	Напряжения и токи промышленной частоты при КЗ на землю. Испытания электрической прочности изоляции (напряжение в установившемся режиме) и импульсным напряжением.	ГОСТ 30328-95 МЭК 60255-5	-	2000 В переменного тока	Для всех портов питания и для портов проводных цепей, выходящих на РУ
Порт корпуса					
2	Магнитные поля промышленной частоты от силового оборудования в нормальных и аварийных режимах. На устойчивость к воздействию магнитного поля промышленной частоты	ГОСТ Р 50648-94 (МЭК 61000-4-8).	5 ст. жест.	100А/м (длительно), 1000А/м (кратковременно)	Для устройств чувствительных к магнитным полям
			2 ст. жест.	3А/м (длительно)	Для мониторов с электронно-лучевой трубкой
3	Электромагнитные поля радиочастотного диапазона от внешних и внутренних устройств связи. На устойчивость к излучаемым радиочастотным электромагнитным полям	ГОСТ Р 51317.4.3-99 (МЭК 61000-4-3).	Не ниже 3 ст. жест.	10В/м	Для всех устройств.

Продолжение таблицы 5.1

№ п/п	Вид электромагнитных воздействий и испытаний на помехоустойчивость	Нормативный документ	Степень жесткости испытаний (тип соединения)	Параметр	Примечание
4	Импульсные магнитные поля от молнии и первичных цепей. На устойчивость к импульсному магнитному полю.	ГОСТ Р 50649-94 (МЭК 61000-4-10-93).	Не ниже 4 ст. жест.	300А/м	Для устройств чувствительных к магнитным полям.
5	Разряды статического электричества с персонала. На устойчивость к разрядам статического электричества.	ГОСТ Р 51317.4.2-99 (МЭК 61000-4-2-95, МЭК 60255-22-2-96).	Не ниже 3 ст. жест	6кВ контактный, 8кВ воздушный	Для всех устройств.
Сигнальные порты					
6	Импульсные помехи, возникающие при	ГОСТ Р 51317.4.12-99	Локальное Полевое	-	Для всех устройств.
	коммутациях силового оборудования и КЗ на первичной стороне. На устойчивость к колебательным затухающим помехам.	(МЭК 61000-4-12-96)	1. ст. жест. (для однократных) 2 ст. жест. (для повторяющихся) С оборудованием 2. ст. жест. (для однократных) 3 ст. жест. (для повторяющихся)	2кВ (провод - земля), 1кВ (провод - провод) 1кВ (провод - земля), 0,5кВ (провод - провод) 4кВ(провод - земля), 2кВ противофазное 2,5кВ (провод - земля), 1кВ (провод - провод)	

Продолжение таблицы 5.1

№ п/п	Вид электромагнитных воздействий и испытаний на помехоустойчивость	Нормативный документ	Степень жесткости испытаний (тип соединения)	Параметр	Примечание
7	Импульсные помехи от токов молнии. На устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии.	ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95).	<u>Локальное</u> Провод - земля 2 ст. жест. Провод - провод 1 ст. жест. <u>Полевое</u> Провод - земля 3 ст. жест. Провод - провод ст. жест. <u>С оборудованием</u> Провод - земля 4 ст. жест. Провод - провод ст. жест.	1кВ 0,5 кВ 2кВ 1 кВ 4кВ 2 кВ	Для всех устройств.
8	Наносекундные импульсные помехи от электромеханических устройств в системах электропитания постоянного и переменного тока. На устойчивость к наносекундным импульсным помехам	ГОСТ Р 51317.4-4-99 (МЭК 61000-4-4-95, МЭК 60255-22-4).	<u>Локальное</u> 3 ст. жест. <u>Полевое</u> 4 ст. жест. <u>С оборудованием</u> Спец. Ст. жест.	1кВ 2кВ 4кВ	Для всех устройств.
9	На устойчивость к кондуктивным помехам, в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц.	ГОСТ Р 51317.4.6-99 (МЭК 61000-4-6-96).	3 ст. жест.	10 В	Для всех сигнальных портов.
Питание постоянным током					
10	Провалы напряжения	МЭК 61000-4-29	30% (1с) 60% (0,1с)		Только для входных портов.
	Прерывания напряжения		100% (0,5с)		

Продолжение таблицы 5.1

№ п/п	Вид электромагнитных воздействий и испытаний на помехоустойчивость	Нормативный документ	Степень жесткости испытаний (тип соединения)	Параметр	Примечание
11	На устойчивость к пульсациям напряжения постоянного тока.	ГОСТ Р 51317.4.17-2000 (МЭК 61000-4-17-99).	Не ниже 3 ст. жест.	Пульсации не выше 10%.	Для всех портов питания постоянного тока.
12	Кондуктивные помехи от внешних и внутренних источников. На устойчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 0 до 150 кГц.	ГОСТ Р 51317.4.16 - 2000 (МЭК 61000-4-16-96).	Не ниже 3 ст. жест.	10В (длительно) 100В (1с)	Для всех портов питания постоянного тока.
13	Импульсные помехи от токов молнии. На устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии.	ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95).	Провод - земля 3 ст. жест. Провод - провод 2 ст. жест.	2кВ 1 кВ	Для всех портов питания постоянного тока.
14	Наносекундные импульсные помехи от электромеханических устройств в системах электропитания постоянного и переменного тока. На устойчивость к наносекундным импульсным помехам	ГОСТ Р 51317.4-4-99 (МЭК 61000-4-4-95, МЭК 60255-22-4).	4 ст. жест.	4кВ	Для всех портов питания постоянного тока.
15	Кондуктивные помехи от внешних и внутренних источников. На устойчивость к кондуктивным помехам, в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц.	ГОСТ Р 51317.4.6-99 (МЭК 61000-4-6-96).	3 ст. жест.	10 В	Для всех портов питания постоянного тока.

Продолжение таблицы 5.1

№ п/п	Вид электромагнитных воздействий и испытаний на помехоустойчивость	Нормативный документ	Степень жесткости испытаний (тип соединения)	Параметр	Примечание
16	Импульсные помехи, возникающие при коммутациях силового оборудования и КЗ на первичной стороне. На устойчивость к колебательным затухающим помехам	ГОСТ Р 51317.4.12-99 (МЭК 61000-4-12)	4 ст. жест. (для однократных) 3 ст. жест. (для повторяющихся)	4кВ (провод - земля), 2кВ (провод - провод) 2,5кВ (провод - земля), 1кВ (провод -провод)	Для всех портов питания постоянного тока.
Питание переменным током					
17	Провалы напряжения	МЭК 61000-4-29	30% (5 периодов) 60% (1 период)	Только для входных портов.	
	Прерывания напряжения		100% (5 периодов)		
18	На устойчивость к гармоникам и интергармоникам, к сигналам систем телеуправления и сигнализации в напряжении сети переменного тока.	ГОСТ 29280-92 (МЭК 61000-4, МЭК 61000-4-13).	В соответствии с рекомендациями настоящих МУ.		Для всех портов питания переменного тока.
	На устойчивость к колебаниям напряжения	ГОСТ Р 51317.4.14-2000 (МЭК 61000-4-14-2000).			
	На устойчивость к динамическим изменениям напряжения электропитания	ГОСТ Р 51317.4.11-99 (МЭК 61000-4-11-94).			
19	На устойчивость к изменениям частоты питания в сети переменного тока	ГОСТ Р 51317.4..28 - 2000 (МЭК 61000-4-28-2000).			
20	На устойчивость к кондуктивным помехам, в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц..	ГОСТ Р 51317.4.6-99 (МЭК 61000-4-6-96).	Не ниже 3 ст. жест.	(10В)	Для всех портов питания переменного тока.

Окончание таблицы 5.1

№ п/п	Вид электромагнитных воздействий и испытаний на помехоустойчивость	Нормативный документ	Степень жесткости испытаний (тип соединения)	Параметр	Примечание
21	Импульсные помехи, возникающие при коммутациях силового оборудования и КЗ на первичной стороне. На устойчивость к колебательным затухающим помехам.	ГОСТ Р 51317.4.12-99 (МЭК 61000-4-12)	4 ст. жест. (для однократных) 3 ст. жест. (для повторяющихся)	4кВ (провод - земля), 2кВ (провод - провод) 2,5кВ (провод - земля), 1кВ (провод - провод)	Для всех портов питания переменного тока.
22	На устойчивость к наносекундным импульсным помехам	ГОСТ Р51317.4- 4-99 (МЭК 61000-4-4-95, МЭК 60255-22-4).	4 ст. жест.	4кВ	Для всех портов питания переменного тока.
23	Импульсные помехи от токов молнии. На устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии.	ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-96).	Провод -земля 4 ст. жест. Провод -провод 3 ст. жест.	4кВ 2 кВ	Для всех портов питания переменного тока.
Порт функционального заземления					
24	На устойчивость к наносекундным импульсным помехам (ввод помехи применением емкостных клещей связи)	ГОСТ Р51317.4- 4-99 (МЭК 61000-4-4-95, МЭК 60255-22-4).	4 ст. жест.	4кВ	Требования применяют к соединениям с функциональным заземлением, отделенным от защитного заземления.
25	Кондуктивные помехи от внешних и внутренних источников. На устойчивость к кондуктивным помехам, в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц..	ГОСТ Р 51317.4.6-99 (МЭК 61000-4-6-96).	Не ниже 3 ст. жест.	(10В)	10В=140дБ (мкВ)
Помехоэмиссия					
26	Радиопомехи от оборудования. Помехоэмиссия.	ГОСТ Р 51318.22- 99 (СИСПР 22-97) ГОСТ Р 51318.11-99 (СИСПР 11-97)	В соответствии с ГОСТ		
Заземляющее устройство					
27	Соппротивление заземления	ПУЭ п.1.7.90	Степень жесткости 1-4	0,5 Ом·м	

5.1.5 Термины и определения

Для целей настоящих методических указаний применяются следующие термины и их определения:

Внешние устройства молниезащиты – комплекс, состоящий из молниеприемников, токоотводов и заземлителей.

Внешний контур заземления (здания) – замкнутый горизонтальный заземлитель, проложенный вокруг здания.

Внутреннее устройство заземления (здания) – совокупность заземляющих проводников, расположенных внутри здания.

Выносной заземлитель – заземлитель, выполненный за пределами территории энергообъекта.

Вторичное оборудование – аппаратура (устройства) релейной защиты и электроавтоматики, противоаварийной автоматики; автоматизированной системы управления технологическим процессом; автоматизированной системы диспетчерского управления; системы сбора и передачи информации; автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии; противопожарной системы; охранной сигнализации; видеонаблюдения; система оперативного постоянного тока; система собственных нужд напряжением 0,4кВ переменного тока; системы управления и сигнализации вспомогательного оборудования; система диагностики силового оборудования, контрольные кабели и т.п.

Заземляющее устройство – совокупность заземлителя и заземляющих проводников.

Заземлитель – проводящая часть или совокупность соединенных между собой проводящих частей, находящихся в электрическом контакте с землей непосредственно или через промежуточную проводящую среду.

Заземляющий проводник (РЕ – проводники) – проводник, предназначенный для целей электробезопасности.

Зона нулевого потенциала (относительная земля) – часть земли, находящаяся вне зоны влияния какого-либо заземлителя, электрический потенциал которой принимается равным нулю.

Излучаемая электромагнитная помеха – электромагнитная помеха, распространяющаяся в пространстве.

Класс (степень) жесткости – соответствующий уровень испытательного электромагнитного воздействия.

Кондуктивная электромагнитная помеха – электромагнитная помеха, распространяющаяся в проводнике.

Молниеприемник – часть молниеотвода, предназначенная для перехвата молнии.

Магистраль заземления – заземляющий проводник с двумя или более ответвлениями.

Напряжение прикосновения – напряжение между двумя точками цепи тока замыкания на землю (на корпус) при одновременном прикосновении к ним человека.

Разность потенциалов на заземляющем устройстве – разность потенциалов, возникающая между различными точками заземляющего устройства при кратком замыкании на подстанции, вызванная продольными токами и сопротивлением проводников заземляющей системы.

Разряд статического электричества – импульсный перенос электрического заряда между телами с разными электростатическими потенциалами при непосредственном контакте или при сближении их на некоторое, достаточно малое расстояние.

Показатель качества электрической энергии – величина, характеризующая качество электрической энергии по одному или нескольким ее параметрам.

Противофазная помеха – электромагнитная (кондуктивная) помеха, возникающая между фазным проводом и землей.

Пульсации напряжения постоянного тока – процесс периодического или случайного изменения постоянного напряжения относительно его среднего уровня в установившемся режиме работы источника, преобразователя электрической энергии или системы электроснабжения.

Синфазная помеха – электромагнитная (кондуктивная) помеха, возникающая между двумя фазными проводами.

Сопротивление заземляющего устройства – отношение напряжения на заземляющем устройстве к току, стекающему с заземлителя в землю.

Ток замыкания на землю – ток, стекающий в землю в месте замыкания.

Токоотвод – часть молниеотвода, предназначенная для отвода тока молнии от молниеприемника к заземлителю.

Устойчивость к электромагнитной помехе, помехоустойчивость – способность ТС сохранять заданное качество функционирования значениями воздействия на него внешних помех с регламентируемыми значениями параметров в отсутствие дополнительных средств защиты от помех, не относящихся к принципу действия или построения ТС.

Уровень устойчивости к электромагнитной помехе, уровень помехоустойчивости – максимальный уровень электромагнитной помехи конкретного вида, воздействующей на определенное ТС, при котором ТС сохраняет заданное качество функционирования.

Электромагнитная совместимость технических средств (ЭМС ТС) – способность ТС функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим ТС.

Электромагнитная обстановка – совокупность электромагнитных явлений, процессов в заданной области пространства, в частотном и временном диапазоне.

Электромагнитная помеха – электромагнитное явление, процесс, которые ухудшают или могут ухудшить качество функционирования ТС.

Электромагнитное возмущение (воздействие) – любое электромагнитное явление, которое может ухудшить работы прибора, оборудования или системы, или неблагоприятно влиять на срок службы.

Электромагнитное излучение от источника помех – явление, процесс, при котором электромагнитная энергия излучается источником помехи в пространство в виде электромагнитных волн.

Электропроводность грунта - (Ом·м) - параметр, определяющий собой уровень "электропроводности" земли как проводника, то есть как хорошо будет растекаться в такой среде электрический ток от заземлителя. Это измеряемая величина, зависящая от состава грунта, размеров и плотности прилегания друг к другу его частиц, влажности и температуры, концентрации в нем растворимых химических веществ (солей, кислотных и щелочных остатков).

5.1.6 Теоретические основы метода вертикального электрического зондирования

Электрические параметры заземлителей и устройств для выравнивания электрических потенциалов полностью определяются их размерами и электрической структурой земли т.е. распределением удельного сопротивления в верхних слоях земной коры, в пределах которой наблюдается растекание токов.

Структура земли зависит от следующих основных факторов: влажность, температура, рода грунта и его уплотненности, а также от времени года. В таблице 5.2 приведены приближенные значения удельного электрического сопротивления различных грунтов.

Таблица 5.2 Приближенные значения удельных электрических сопротивлений различных грунтов и воды

Грунт, вода	Удельное сопротивление, Ом·м		Грунт, вода	Удельное сопротивление, Ом·м	
	возможные пределы колебаний	при влажности 10-20% к массе грунта		возможные пределы колебаний	при влажности 10-20% к массе грунта
Глина	8-70	40	Каменистый	500-800	-
Суглинок	40-150	100	Скалистый	10^4 - 10^7	-
Песок	400-700	700	Вода морская	0,2-1	-
Супесок	150-400	300	Вода речная	10-100	-
Торф	10-30	20	Вода прудовая	40-50	-
Чернозем	9-53	20	Вода грунтовая	20-70	-
Садовая земля	30-60	40	Вода в ручьях	10-60	-

При расчетах заземлителей и устройств для выравнивания электрических потенциалов электрическая структура с достаточным для практических целей приближением может рассматриваться как многослойное (в наиболее важном частном случае двухслойное) проводящее полупространство удельными сопротивлениями, однородными в пределах каждого слоя и с границами слоев, параллельными поверхности земли. Для определения параметров электрической структуры земли и служит вертикальное электрическое зондирования. Оно основано на изучении удельных сопротивлений грунта путем создания в нем искусственного электрического поля, позволяющего судить о значениях ρ в различных слоях земли. При этом могут быть использованы постоянные, пульсирующие и переменные электрические поля низкой частоты. Физическая сущность вертикального электрического зондирования сводится к следующему. В землю при помощи двух точечных заземлителей (питающих электродов А и В) от источника питания Е вводится электрический ток I рис. 5.1.

В теории геоэлектрических методов исследований доказывается, что заземляющий электрод любой конфигурации можно рассматривать как точечный начиная с расстояний, приблизительно в 5 раз превышающих протяженность его заглубленной части. То же положение относится и к системам из нескольких электродов. Такая система, какой бы сложной конфигурации она ни была, будет эквивалентна точечному заземлителю в случае, если наблюдения выполняются в точках, удаленных от центра системы на расстояние, превышающее в 5 раз расстояние между двумя наиболее удаленными друг от друга крайними электродами системы.

Электрический ток, проходя по толще земли от одного электрода к другому, захватит большие глубины. Ближе к электродам и вообще поверхности земли плотность тока больше, а с глубиной она уменьшается и на очень больших глубинах практически становится равной нулю.

Общая картина распространения тока в земле приведена на рисунке 5.1 где сплошными линиями показаны линии тока, а пунктирными — эквипотенциальные, т.е. линии равных потенциалов.

Поскольку земля, как мы уже знаем, обладает сопротивлением, то в ней на всех участках происходит падение напряжения. Если поместить в пределах поля два приемных (потенциальных) электрода М и N, то между ними возникнет разность электрических потенциалов ΔU , которая связана со значением питающего тока I формулой:

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I}, \quad (5.1)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление среды, расположенной в пределах установки AMNB;

K – коэффициент, зависящий только от взаимного расположения электродов.

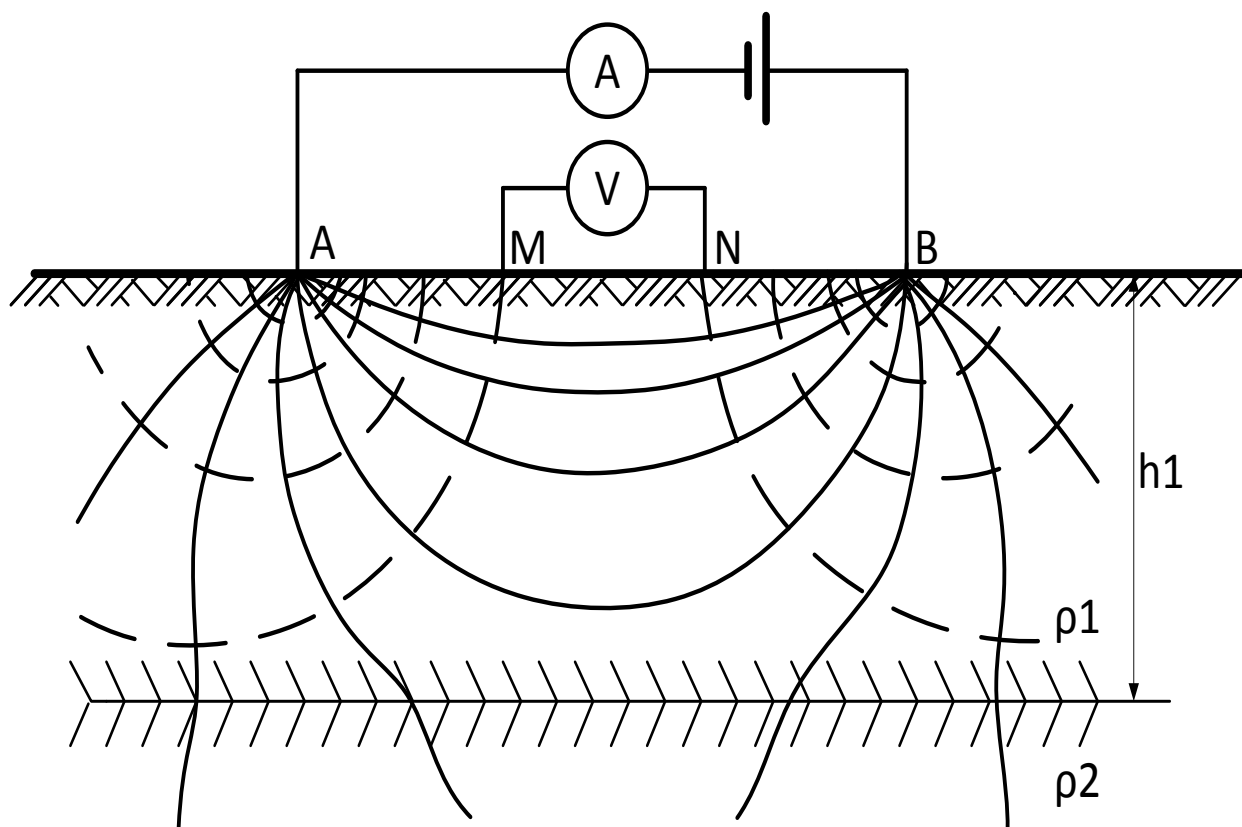


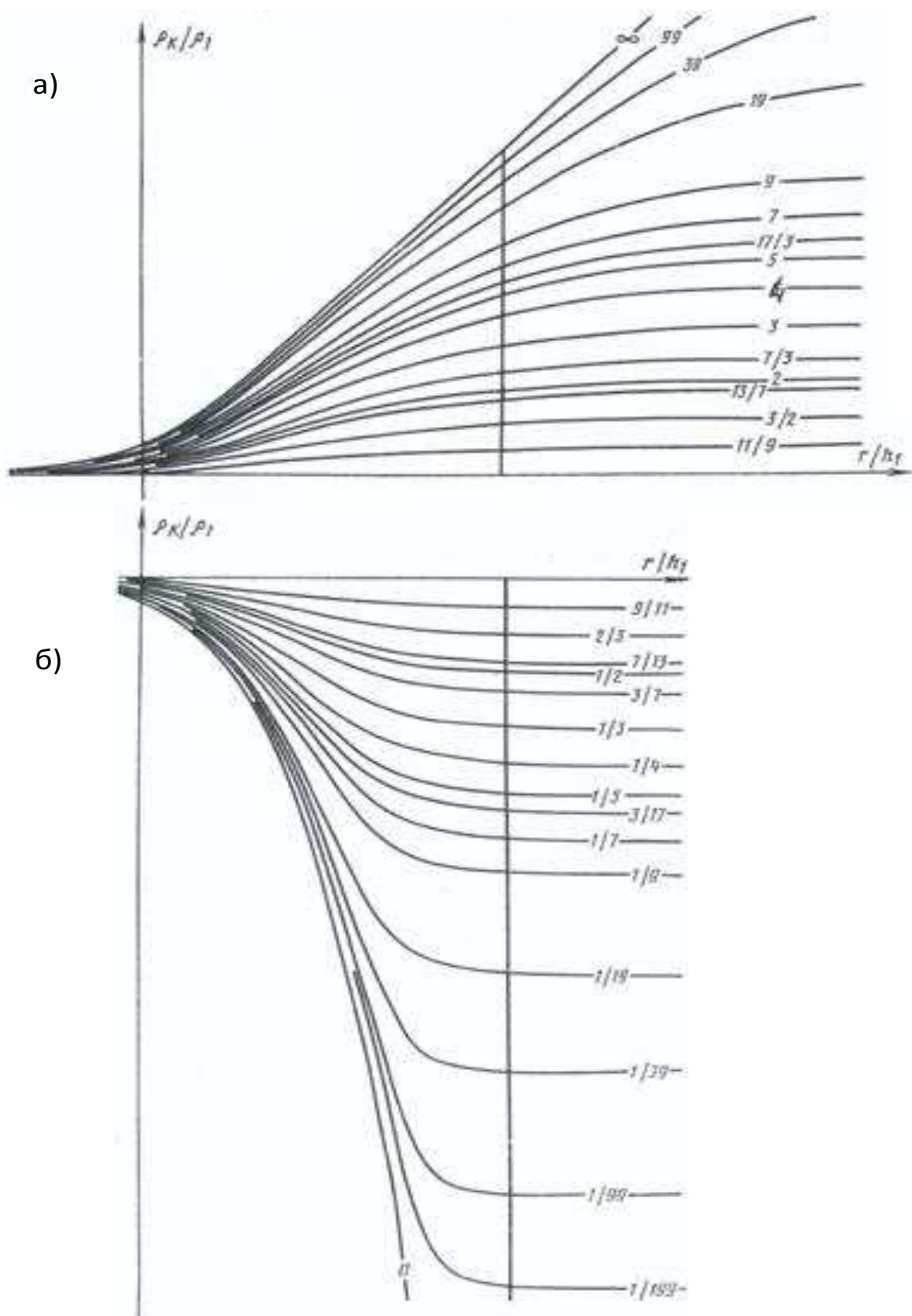
Рисунок 5.1 – Электрическое поле в земле при вертикальном электрическом зондировании

Заметим, что формула в таком виде, как она записана, справедлива только для однородной среды, т.е. для среды с одинаковым удельным сопротивлением, или по крайней мере для среды, у которой области иными удельными сопротивлениями находятся настолько далеко от измерительной установки, что их влияние на результаты измерений практически неощутимо. Когда же среда электрически неоднородна, то, проводя те же самые измерения и вычисления, мы получаем некоторую величину, которая будет находится в сложной зависимости от залегания пород в пределах данного участка, от удельных электрических сопротивлений этих пород и от размера установки, т.е. от расстояний между её электродами. Эту величину принято называть кажущимся удельным электрическим сопротивлением и обозначать ρ_k . В то время как значение удельного электрического сопротивления, найдено по (5.1), при измерениях в однородной среде остается одним и тем же при любых расстояниях

между электродами, значение кажущегося удельного сопротивления в неоднородной среде существенно зависит от расстояния между электродами. Изучения изменений удельного сопротивления при различных расстояниях между электродами измерительной установки дает материал для суждений о характере строения той среды, над которой проводятся измерения. В этом и заключается сущность метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Для ВЭЗ используются установки различного типа, изменение которых определяется, с одной стороны, условиями задачи (размерами территории подстанции, токами однофазных коротких замыканий на землю и т.д.) и с другой стороны, соображениями технического характера – удобством перемещения, наличием аппаратуры, источников питания и т.д.

Результатом измерения электропроводности грунта по методу ВЭЗ, является зависимость $\rho_{\text{каж}} = f(L_{AB})$, то есть зависимость кажущегося удельного сопротивления грунта от расстояния между токовыми электродами. Параметры двухслойной модели грунта определяются на основе совмещения полученной зависимости $\rho_{\text{каж}} = f(L_{AB})$, построенной в билогарифмических координатах, с одной из стандартных кривых зависимостей представленных на рисунке 5.2.

Известно, что электропроводность грунта зависит от сезонности в климатических зонах. Сезонному изменению электропроводности подвергается верхний слой грунта толщиной от 1-2 м. Коэффициенты сезонности и признаки климатических зон соответственно приведены в таблицах 5.1. и 5.4.



а - $\rho_1 < \rho_2$; б - $\rho_1 > \rho_2$

Рисунок 5.2 – Стандартные кривые зависимости $\rho_K = f(r)$ для двухслойной модели грунта.

Таблица 5.3 Коэффициенты сезонности ψ для слоя сезонных измерений в многослойной земле

Климатическая зона по табл. 2.2	Условная толщина слоя изменений, м	Состояние (увлажненность) земли во время измерений ее сопротивления		
		повышенной влажности	нормальной влажности	малой влажности
1	2	3	4	5
I	1	7,0	4,0	2,7
II	1	5,0	2,7	1,9
III	1	4,0	2,0	1,5
IV	1	2,5	1,4	1,1

Таблица 5.4 Признаки климатических зон для определения коэффициентов сезонности ψ

Характеристика климатической зоны	Климатические зоны России			
	I	II	III	IV
Средняя многолетняя низшая температура (январь), °С	От –20 до –15	От –14 до –10	От – 10 до 0	От 0 до +5
Средняя многолетняя высшая температура (июль), °С	От +16 до +18	От +18 до +22	От +22 до +24	От +24 до +26
Среднегодовое количество осадков, см	40	50	50	30-50
Продолжительность заморозания вод, дни	190-170	150	100	0

5.1.7 Лабораторная работа «Оценка электрических параметров земли»

Цель работы: Изучение метода ВЭЗ для определения параметров двухслойной модели и эквивалентного удельного электрического сопротивления земли

Перечень приборов: мультитестер Bort BMM-1000N

Порядок выполнения работы

1) Подаем напряжение на схему. Включаем автоматический выключатель QF1, загорается красная сигнальная лампа HL1, которая указывает, что напряжение на схему подано.

2) Подготавливаем приборы для измерения электрических величин. На амперметре, в качестве которого выступает мультитестер Bort BMM-1000N, выставляем предел по переменному току (\sim) 20А, а на вольтметре предел переменного напряжения (\sim) 20В.

3) Для определения электропроводности грунта разносим токовые электроды (AB) на расстояние 1м (позиция 1-1), а потенциальные электроды (MN) на расстояние 0,5м (позиция 0,5-0,5), что соответствует первому пункту таблицы 5.5. Далее включаем тумблер SA1 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4 А. Фиксируем значение напряжения между электродами MN и величину тока в цепи. Заносим результаты измерений тока и напряжения в таблицу 5.5.

4) Тумблер SA1 остается включенным для каждого опыта, указанного в таблице 5.5.

5) Разносим токовые электроды AB на расстояние 2 метра (позиция 2-2), а потенциальные электроды MN остаются в прежнем положении, что соответствует второму пункту таблицы 5.5. Включаем тумблер SA2 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре выставляем предел переменного напряжения (\sim) 2В и

фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN и величину тока в цепи. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 5.5. Выключаем тумблер SA2.

6) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 3 метра (позиция 3-3), а потенциальные электроды MN остаются в прежнем положении, что соответствует третьему пункту таблицы 5.2. Включаем тумблер SA3 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 2В и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN и величину тока в цепи. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 5.5. Выключаем тумблер SA3.

7) Токовые электроды АВ остаются в прежнем положении, а потенциальные электроды MN разносим на расстояние 2 м (позиция 2-2), что соответствует четвертому пункту таблицы 5.5. Включаем тумблер SA4 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 2В и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN и величину тока в цепи. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 5.5. Выключаем тумблер SA4.

8) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 4,5 метра (позиция 4,5-4,5), а потенциальные электроды MN остаются в прежнем положении, что соответствует пятому пункту таблицы 5.5. Включаем тумблер SA5 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения 2В и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 5.5. и величину тока в цепи. Выключаем тумблер SA5.

9) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 6 метра (позиция 6-6), а потенциальные электроды MN остаются в прежнем положении, что соответствует шестому пункту таблицы 5.5. Включаем тумблер SA6 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 2В и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN и величину тока в цепи. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 5.5. Выключаем тумблер SA6.

10) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 9 метра (позиция 9-9), а потенциальные электроды MN остаются в прежнем положении, что соответствует седьмому пункту таблицы 5.5. Включаем тумблер SA7 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 2В и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN и величину тока в цепи. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 5.5. Выключаем тумблер SA7.

10) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 15 метра (позиция 15-15), а потенциальные электроды MN остаются в прежнем положении, что соответствует восьмому пункту таблицы 5.5. Включаем тумблер SA8 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 2В и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN и величину тока в цепи. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 5.5. Выключаем тумблер SA8.

11) Токовые электроды АВ остаются в прежнем положении, а потенциальные электроды MN разносим на расстояние 10 м (позиция 10-10), что соответствует девятому пункту таблицы 5.5. Включаем тумблер SA9 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения

0,4А. На вольтметре выставляем предел переменного напряжения (~) 2В и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN и величину тока в цепи. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 5.5. Выключаем тумблер SA9.

12) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 25 метра (позиция 25-25), а потенциальные электроды MN разносим на расстояние 2 м (позиция 2-2), что соответствует десятому пункту таблицы 5.5. Включаем тумблер SA10 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре выставляем предел переменного напряжения (~) 200мВ и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN и величину тока в цепи. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 5.5. Выключаем тумблер SA10.

13) Токовые электроды АВ остаются в прежнем положении, а потенциальные электроды MN разносим на расстояние 10 м (позиция 10-10), что соответствует одиннадцатому пункту таблицы 5.5. Включаем тумблер SA11 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре выставляем предел переменного напряжения (~) 200мВ и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN и величину тока в цепи. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 5.5. Выключаем тумблер SA11.

14) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 40 метра (позиция 40-40), а потенциальные электроды MN остаются в прежнем положении, что соответствует двенадцатому пункту таблицы 5.5. Включаем тумблер SA12 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 200мВ и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN и величину тока в цепи. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 5.5. Выключаем тумблер SA12.

15) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 65 метра (позиция 65-65), а потенциальные электроды MN остаются в прежнем положении, что соответствует тринадцатому пункту таблицы 5.5. Включаем тумблер SA13 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 200мВ и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN и величину тока в цепи. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 5.5. Выключаем тумблер SA13.

16) Токовые электроды АВ остаются в прежнем положении, а потенциальные электроды MN разносим на расстояние 40 м (позиция 40-40), что соответствует четырнадцатому пункту таблицы 5.5. Включаем тумблер SA14 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 200мВ и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN и величину тока в цепи. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 5.5. Выключаем тумблер SA14.

17) Разносим токовые электроды АВ на расстояние 100 метра (позиция 100-100), а потенциальные электроды MN разносим на расстояние 10 м (позиция 10-10), что соответствует пятнадцатому пункту таблицы 5.5. Включаем тумблер SA15 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения 0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 200мВ и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN и величину тока в цепи. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 5.5. Выключаем тумблер SA15

18) Токовые электроды АВ остаются в прежнем положении, а потенциальные электроды MN разносим на расстояние 40 м (позиция 40-40), что соответствует шестнадцатому пункту таблицы 5.5. Включаем тумблер SA16 и настраиваем ток, с помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$, до значения

0,4А. На вольтметре оставляем предел переменного напряжения (~) 200мВ и фиксируем напряжение между потенциальными электродами MN и величину тока в цепи. Полученные значения измерений тока и напряжения заносим в таблицу 5.5. Выключаем тумблер SA16.

19) Для каждого пункта таблицы 5.5. рассчитываем кажущиеся сопротивление по формуле:

$$R_{\text{каж}} = \frac{U}{I}, \quad (5.2)$$

и кажущееся удельное электрическое сопротивление грунта определяем по выражению:

$$\rho_{\text{каж}} = R_{\text{каж}} \cdot k \quad (5.3)$$

Записываем рассчитанные значения в соответствующие столбцы таблицы 5.5.

Таблица 5.5. Результаты измерений для определения характеристик электрической структуры грунта по методу ВЭЗ.

№ измерения	$L_{AB/2}$, м	$L_{MN/2}$, м	k, м	I, А	U, В	$R_{\text{каж}} = U/I$	$\rho_{\text{каж}}$, Ом · м
1	1	0,5	5,890				
2	2	0,5	24,74				
3	3	0,5	56,16				
4	3	2	12,57				
5	4,5	2	30,24				
6	6,0	2	54,98				
7	9,0	2	125,7				
8	15	2	351,9				
9	15	10	62,83				
10	25	2	980,2				
11	25	10	188,5				
12	40	10	494,8				
13	65	10	1319				
14	65	40	300,4				
15	100	10	3134				
16	100	40	754,0				

20) По данным таблицы 5.5. строим зависимость $\rho_{\text{каж}} = f(L_{AB/2})$ в билогорифмических координатах. Сетка билогарифмических координат приведена на рис 5.2

21) Сравниваем полученную зависимость со стандартными кривыми, показанную на рисунке 2.11 и записываем значение коэффициента μ

22) Вертикальная ось в начале кривой на оси абсцисс указывает толщину верхнего слоя грунта h_1 , м. Горизонтальная ось, проходящая через начало кривой, по оси ординат указывает удельное эклектическое сопротивление первого слоя грунта ρ_1 , Ом · м.

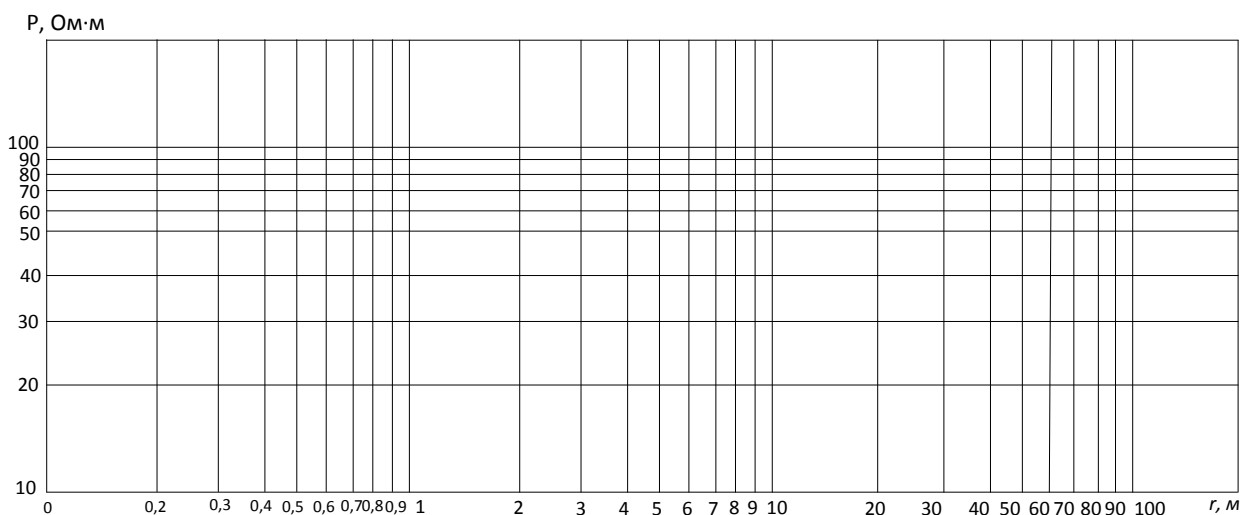


Рисунок 5.3 – Зависимость $\rho_{\text{каж}} = f(L_{AB/2})$, рассчитанная по методу ВЭЗ

21) Сравниваем полученную зависимость со стандартными кривыми, показанную на рисунке 5.3 и записываем значение коэффициента μ

22) Вертикальная ось в начале кривой на оси абсцисс указывает толщину верхнего слоя грунта h_1 , м. Горизонтальная ось, проходящая через начало кривой, по оси ординат указывает удельное эклектическое сопротивление первого слоя грунта ρ_1 , Ом·м.

23) Рассчитываем удельное электрическое сопротивление нижнего слоя грунта по формуле

$$\rho_2 = \mu \cdot \rho_1, \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (5.4)$$

24) записываем параметры двухслойной модели грунта для летнего периода.

$$\rho_1 = \quad \text{Ом} \cdot \text{м}; \quad h_1 = \quad , \text{м};$$

$$\rho_2 = \quad \text{Ом} \cdot \text{м}; \quad h_1 = \infty , \text{м}.$$

25) Определяем параметры грунта для зимнего времени года.

$$\rho_{\text{изм}} = \rho_1 \cdot \psi \quad (5.5)$$

В зимний период года, как правило, изменяется электропроводность верхнего слоя грунта, его значения возрастает в зависимости от региона, где расположена подстанция. Поправочный коэффициент называется сезонным коэффициентом, его значения приведены в таблице 5.3.

Признаки климатических зон для определения коэффициентов сезонности ψ приведены в таблице 5.4

Характеристики климатических зон и увлажненность грунта выдает преподаватель.

26) Определяем эквивалентное удельное сопротивление грунта для зимнего и летнего периода времени года в нижеследующем порядке:

$$\rho_{\text{экв}} = \rho_1 (\rho_1 / \rho_2)^k \quad (5.6)$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельное сопротивление верхних и нижних слоев грунта полученные при выполнения лабораторной работы;

k – показатель степени, который определяется в зависимости от соотношения ρ_1 / ρ_2 :

при $0,1 \leq \rho_1 / \rho_2 \leq 1$

$$k = 0,32 \left(1 + 0,26 \ln \frac{h_1}{l_{\text{в}}} \right); \quad (5.7)$$

при $1 \leq \rho_1 / \rho_2 \leq 10$

$$k = 0,43 \left(l_{\text{отн}} + 0,272 \ln \frac{a\sqrt{2}}{l_{\text{в}}} \right); \quad (5.8)$$

h_1 – толщина верхнего слоя грунта, м; $l_{\text{в}}$ – длина вертикального электрода, м; a – расстояние между вертикальными электродами, м; $l_{\text{отн}}$ – относительная длина верхней части вертикального электрода, то есть части, находящейся в верхнем слое земли, м:

$$l_{\text{отн}} = \frac{(h_1 - t_{\text{в}})}{l_{\text{в}}}; \quad (5.9)$$

$t_{\text{в}}$ – глубина погружения в землю верхнего конца вертикального электрода, м.

В расчетах принять: $l_{\text{в}} = 3\text{м}$; $t_{\text{в}} = 0,5\text{м}$; $a = 5\text{м}$.

27) Сделать вывод, во сколько раз изменяется удельное электрическое сопротивление в зимний период, по сравнению с летним и как это может отразиться на сопротивлении заземляющего устройства подстанции.

28) Оформить отчет.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое электропроводность грунта?
2. Какую величину принято называть кажущимся удельным электрическим сопротивлением?
3. Для чего служит метод вертикального электрического зондирования?
4. На чем основан метод вертикального электрического зондирования?
5. Как изменится электропроводность верхнего слоя грунта в зимнее время года?
6. Какой коэффициент отражает сезонные изменения грунта и от чего он зависит?
7. На какую глубину может промерзнуть верхний слой грунта в зимний период времени?
8. От каких факторов зависит электропроводность грунта?
9. Как влияет влажность на электропроводность грунта?
10. Что лучше проводит электрический ток скальная порода или глина?

5.2 Возможные варианты выполнения лабораторной работы с исходными данными и полученными результатами

Разработанный стенд позволяет выполнить лабораторную работу «Оценка электропроводности грунта» в двенадцати вариантах. В каждом варианте изменяется коэффициент сезонности в многослойной земле, в следствии чего меняется значение удельного электрического сопротивления верхнего слоя грунта.

Результаты вариантов с полученными данными для лабораторной работы «Оценка электропроводности грунта» приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Результаты вариантов с полученными данными для лабораторной работы

Климатическая зона	Состояние (увлажненность) земли во время измерений ее сопротивления	ψ	ρ_1 , Ом · м	ρ_2 , Ом · м	ρ_1/ρ_2	$\rho_{\text{ЭКВ}}$	k
I	повышенной влажности	4	236	44	5,36	315,01	0,172
	нормальной влажности	7	413	44	9,39	607,08	
	малой влажности	2,7	159,3	44	3,62	198,75	
II	повышенной влажности	5	295	44	6,7	409,17	
	нормальной влажности	2,7	159,3	44	3,62	198,75	
	малой влажности	1,9	112,1	44	2,55	131,7	
III	повышенной влажности	4	236	44	5,36	315,01	
	нормальной влажности	2	118	44	2,68	139,8	
	малой влажности	1,5	88,5	44	2,01	99,8	
IV	повышенной влажности	2,5	147,5	44	3,35	181,6	
	нормальной влажности	1,4	82,6	44	1,88	92,07	
	малой влажности	1,1	64,9	44	1,48	69,43	

6 Выполнение условий безопасности жизнедеятельности при монтаже и наладке лабораторного стенда

Безопасность жизнедеятельности – это состояние деятельности, при которой с определенной вероятностью исключаются потенциальные опасности, влияющие на здоровье человека.

Безопасность – это комплексная система мер по защите человека и среды его обитания от опасностей формируемых конкретной деятельностью. Чем сложнее вид деятельности, тем более расширена система защиты.

Для обеспечения безопасности конкретной деятельностью должны быть решены три задачи:

1. Разработать эффективные меры защиты человека и среды обитания от выявленных опасностей. Под "эффективными" подразумеваются такие меры по защите, которые при минимуме материальных затрат обеспечивают максимальный эффект;

2. Произвести полный детальный анализ опасностей, формируемых в изучаемой деятельности;

3. Разработать эффективные меры защиты от остаточного риска данной деятельности. Они необходимы, так как обеспечить абсолютную безопасность деятельности невозможно.

6.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов

Рабочее место - СФУ, Институт горного дела, геологии и геотехнологии, учебный корпус, кафедра ЭГМП, аудитория №307.

Оборудование - стенд для проведения лабораторных работ («Оценка воздействий высокочастотной составляющей тока КЗ на работу МПУ»).

Таблица 6.1 – Вредные и опасные факторы

№ п/п	Рабочее место или операция технологического процесса	Оборудование	Опасный (вредный) фактор, единица измерения	Величина фактора	Норматив (безопасная величина) со ссылкой на ГОСТ, СНиП и т.п.
1	Аудитория №307	Лабораторный стенд	Напряжение	220В	50В РД153-34.0—3.150-00 п.10.4

6.2 Технические и организационные мероприятия по охране труда

Перед выполнением задания по выполнению лабораторной работы, студент должен пройти инструктаж по безопасному выполнению работы и получить дополнительные указания от преподавателя.

Стенд представляет собой стол размером 1200х750мм. Всё оборудование размещено внутри стенда и на задней стенке. Доступ к токоведущим частям полностью ограничен конструктивным исполнением стенда из изоляционного материала. Все токоведущие части стенда выполнены в двойной изоляции. Дополнительно присутствуют предупреждающие знаки и надпись на крышке задней панели «Не открывать, не отключив от сети» и знак электрической опасности. Дополнительно на стенде обозначена величина напряжения.

Помещение, в котором установлен стенд, имеет температуру окружающего воздуха +25⁰С, при относительной влажности 45%. Вентиляция помещения – естественная. С помощью окон обеспечивается кратность воздухообмена при скорости движения воздуха до 0,5 м/с согласно ГОСТ 30494.

Электробезопасность.

Стенд подключен к сети переменного тока напряжением 24В. На входе питания в стенд установлен автоматический выключатель, который выполняет функции выключателя и защиты, при коротких замыканиях и перегрузках. Питание стенда выполнено путем подключения гибкого кабеля с двойной

изоляции.

Эксплуатационному персоналу запрещается производить разборку стенда, снятие задней и передней стенки без отключения вводного автоматического выключателя на стенде и отключения питающего кабеля путем отключения разъемного соединения на распределительном щитке в аудитории №309 а.

Правила безопасности перед выполнением работы.

Проверить отсутствие напряжения на лабораторном стенде (автоматический выключатель должен быть выключен, индикаторная лампа не должна гореть).

Работая в лаборатории, студенты не должны отвлекаться и отвлекать других. Запрещается самовольное расширение рабочего места.

Студент должен предварительно проверить соответствие выполняемой работы порученному заданию. В случае неясности пригласить для проверки преподавателя или лаборанта.

Правила безопасности при выполнении работы.

Включение стенда производится только с разрешения преподавателя или лаборанта и только после предупреждения об этом всех студентов, работающих на данном рабочем месте.

В случае короткого замыкания эксплуатирующий персонал должен проверить срабатывание автоматического выключателя. При повреждении оборудования, студент должен немедленно отключить автоматический выключатель на щитке рабочего места. Обо всех неисправностях, эксплуатирующий персонал, не делая попыток к исправлению, должен немедленно сообщить преподавателю.

При отсутствии напряжения в цепи автоматический выключатель должен быть в отключенном состоянии.

В случае прекращения опыта или перерыва в работе стенд надо обязательно отключить от сети.

Во время выполнения работы на стенде запрещается:

- Выполнять действия, противоречащие полученным заданиям и методичек;
- Оставлять без наблюдения стенд, находящийся под напряжением;
- Включать не имеющие отношения к данной работе аппараты, приборы и тумблеры.

Студенты должны бережно и аккуратно обращаться с аппаратурой, приборами и инструментами.

Во всех случаях обнаружения неисправного состояния оборудования, измерительных приборов и проводов необходимо немедленно поставить в известность преподавателя.

Правила безопасности по окончании работы.

По окончании лабораторной работы, студент должен поставить в известность преподавателя или лаборанта. После проверки и разрешения преподавателя следует:

- выключить автомат питания;
- навести порядок на рабочем месте;
- сообщить преподавателю или лаборанту об окончании работы на стенде.

Действия в случае аварийной ситуации

- немедленно отключить главный рубильник или автоматический выключатель;
- сообщить руководителю занятий

6.3 Мероприятия по производственной санитарии

Помещение, в котором установлен стенд, имеет стены – побеленные в белый цвет. Пол – деревянный, способ уборки – влажной тряпкой.

Система отопления – централизованное, вид теплоносителя – горячая вода

до 85⁰С. В качестве нагревательного прибора используются чугунные батареи в количестве 4 штук по 7 рёбер.

На каждом этаже имеется мужской и женский санузел. Все санузлы оборудованы умывальниками. На первом этаже размещён гардероб.

Аудитория имеет площадь 68,4 м². Количество оконных проёмов – 4, размеры – 1,5х2,5 м. Оконные рамы выполнены из материала ПВХ с тройным стеклопакетом.

Искусственное освещение аудитории выполнено светильниками с люминесцентными лампами типа ЛД-18. Количество светильников – 18 шт., количество ламп в светильнике – 4шт. Нормируемое освещение согласно СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение" составляет 100 лк.

Данное помещение имеет естественный воздухообмен.

Стенд расположен задней стенкой вплотную к стене здания.

6.4 Мероприятия по пожарной и взрывной безопасности

Возможные источники взрывоопасности – отсутствуют.

Источники пожароопасности: короткое замыкание электрической цепи, небрежное отношение с открытым огнём (проведение ремонтных работ технических коммуникаций). В производстве не используются горючие газообразные, жидкие или твердые вещества.

Аудитория оборудована двумя огнетушителями, в коридоре имеется один огнетушитель и ящик с песком. Огнетушители типа ОП-5. На случай пожара здание учебного корпуса оборудовано противопожарной сигнализацией, звуковым оповещением и включением табличек эвакуационных выходов.

В случае возникновения пожара студент обязан:

- а) немедленно отключить главный рубильник или автоматический выключатель;
- б) принять меры по удалению всех людей из опасной зоны;

в) вызвать пожарную охрану по телефону 01 или 112;

г) принять меры к ликвидации пожара первичными и подручными средствами; при невозможности самостоятельной ликвидации очага пожара - покинуть помещение, плотно закрыв за собой двери.

Доврачебная помощь при поражении человека электрическим током:

1. Освободить пострадавшего от действия электрического тока;
2. Вызвать врача по телефону 03 или 112;
3. При необходимости давать нюхать нашатырный спирт, сделать искусственное дыхание и наружный массаж сердца;
4. Обеспечить пострадавшему покой.

7 Разработка сетевого графика

При написании дипломной работы требуется построение сетевой модели, позволяющей оценить вероятность её завершения в запланированные сроки. Учитывая большой объем работы при создании лаборатории и разработке вышеуказанного стенда «Оценка электрических параметров земли», к выполнению дипломной работы приступили заблаговременно, с учетом того, что общий период не должен превышать 45 дней. Проведем расчет вероятностного сетевого графика.

Составление сетевой модели

Для расчета сетевой модели составляем перечень необходимых работ.

Таблица 7.1 – Перечень необходимых работ

Наименование работы	Код работы	Продолжительность работ
Получение задания на работу	1-2	1
Работа с литературой	2-3	7
Обзор темы	2-4	5
Расчет и оформление дипломной работы	2-8	14
Теоретическое изучение влияния электромагнитных помех на функционирование МПУ	3-7	12
Разработка лаборатории по курсу электромагнитная обстановка и электромагнитная совместимость на подстанциях	4-5	10
Разработка схемы стенда	5-6	13
Разработка конструкции стенда, монтаж, наладка и апробация работы стенда	6-8	10
Разработка методического обеспечения по выполнению лабораторной работы	7-8	9
Рецензирование дипломной работы	8-9	5
Защита дипломной работы	9-10	1

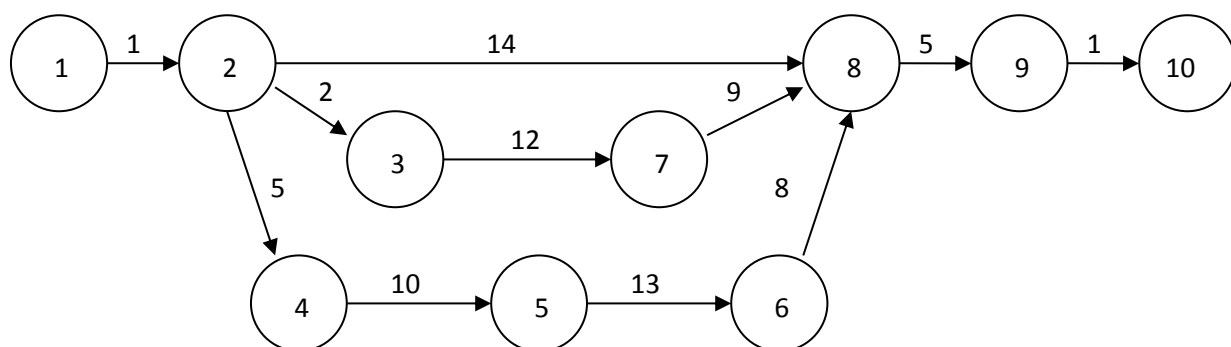


Рисунок 7.1 – Сетевой график выполнения дипломной работы

Рассчитываем параметры сетевого графика и сводим в таблицу 6.2

Таблица 7.2 – Расчет сетевого графика

Номер начального события предшествую щей работы	Код рабо- ты	Раннее начало работы	Раннее окончание работы	Позднее начало работы	Позднее окончан ие работы	Полный резерв времени	Свобод- ный резерв времени
0	1-2	0	1	0	1	0	0
1	2-3	1	3	1	3	13	0
1	2-4	1	6	1	6	0	0
1	2-8	1	15	1	15	22	28
2	3-7	3	15	3	15	13	0
2	4-5	6	16	6	16	0	0
4	5-6	16	29	16	29	0	0
5	6-8	29	37	29	37	0	0
3	7-8	15	24	15	24	13	19
2;6;7	8-9	37	42	37	42	0	0
8	9-10	42	43	42	43	0	0

На сетевом графике 3 пути. Путь 3 является критическим. Его продолжительность – 43 дня и он не имеет резерва пути, но по отношению к сроку выполнения работы резерв составляет 2 дня.

$$L_1: 1-2-8-9-10 \quad t_{L1} = 20$$

$$L_2: 1-2-3-7-8-9-10 \quad t_{L2} = 30$$

$$L_3: 1-2-4-5-6-8-9-10 \quad t_{кр} = t_{L3} = 43$$

Работа 2-3:

Раннее начало работы:

$$t_{рн(23)} = \max t_{(ni)} = 1 \quad (7.1)$$

Раннее окончание работы:

$$t_{po(23)} = t_{pn(23)} + t_{(23)} = 1 + 2 = 3 \quad (7.2)$$

Позднее окончание работы:

$$t_{по(23)} = \min t_{ni} = 3 \quad (7.3)$$

Позднее начало работы:

$$t_{пн(23)} = t_{по(23)} - t_{(23)} = 3 - 2 = 1 \quad (7.4)$$

Полный резерв времени:

$$R_{п(23)} = t_{кр(23)} - t_{p(2)} - t_{(23)} = 43 - 28 - 2 = 13 \quad (7.5)$$

Свободный резерв времени:

$$R_{с(23)} = t_{п(3)} - t_{p(2)} - t_{(23)} = 3 - 1 - 2 = 0 \quad (7.6)$$

Заключение

Основные результаты работы изложены в следующих выводах:

1. Разработанная лаборатория, включающая в себя шесть стендов, позволяет выполнить двенадцать лабораторных работ по курсу «Электромагнитная обстановка и электромагнитная совместимость на подстанциях»

2. Каждый стенд позволяет выполнять лабораторную работу в количестве вариантов от трёх до двенадцати. Варианты выполнения работ выдает преподаватель.

3. Теоретическая проработка вопросов позволила определить основные задачи компьютерного моделирования: грунт должен иметь двухслойную структуру; при моделировании процесса измерения сопротивления заземляющего устройства зависимость между сопротивлением и расстоянием токового электрода должно быть возрастающим, а в диапазоне от (0,6-0,4) максимального удаления потенциального электрода иметь пологий участок.

4. Компьютерное моделирование позволило разработать принципиальную электрическую схему стенда, на которой наглядно демонстрируется использование метода «вертикального электрического зондирования» и «Амперметра-вольтметра» соответственно, для измерения электропроводности грунта и сопротивления заземляющего устройства.

5. Разработка стенда и апробация его работы наглядно демонстрирует порядок измерения электропроводности грунта методом вертикального электрического зондирования и порядок измерения сопротивления заземляющего устройства методом «Амперметра-вольтметра», тем самым позволяет студентам получить практические навыки по использованию данных методов.

6. Разработка методического обеспечения позволяет выполнить 24 варианта лабораторной работы, из них 12 вариантов для определения электропроводности грунта и 12 вариантов для измерения сопротивления заземляющего устройства.

7. Результаты, полученные при выполнении лабораторной работы, полностью соответствуют реальным измерениям электропроводности грунта и сопротивления заземляющего устройства на ПС 220кВ «Минусинская опорная» в летнее время года.

8. В методическом обеспечении имеется сводная таблица контрольных данных по выполнению каждого варианта работы, что позволяет преподавателю оперативно оценивать качество лабораторных работ.

9. Разработанный стенд и методическое обеспечение полностью соответствует цели дипломной работы.

10. В лаборатории предусмотрено все условия для безопасного выполнения лабораторных работ с позиции безопасности жизнедеятельности человека.

11. Разработанный сетевой график позволил рассчитать время и силы для полноценного и качественного выполнения дипломной работы.

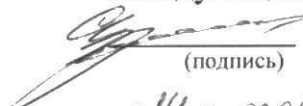
Список используемой литературы

1. Долин, П.А. Основы техники безопасности в электроустановках/П.П. Долин: учебное пособие для вузов. — 2-е изд1984. - 448 с.
2. Коструба, С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств / С. И. Коструба: учебное пособие для вузов. - 2-е изд1983. - 166 с.
3. Отчет по договору № 24 - 16 от 14.06.2016
«Итоговое инструментальное обследование электромагнитной обстановки (ЭМО) на соответствие требованиям по электромагнитной совместимости (ЭМС) после завершения пусконаладочных работ по титулу: «Реконструкция ПС 220кВ Минусинская-опорная в части расширения ЗРУ-10кВ на одну линейную ячейку (для ТП энергопринимающих устройств ООО «Крассети»)»
4. ПУЭ Правила устройства электроустановок. Издание 7 – утверждены приказом Минэнерго России от 08.07.2002 № 204

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА, ГЕОЛОГИИ И ГЕОТЕХНОЛОГИИ
(институт)
ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ГОРНО – МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО
ПРОИЗВОДСТВА
(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 С.В. Кузьмин
(подпись) (инициалы, фамилия)
«14» февраля 2018г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

21.05.04. Горное дело

(код и наименование специальности)

21.05.04.10 Электрификация и автоматизация горного производства

(код и наименование специализации)

«Разработка и внедрение лаборатории по курсу «Электромагнитная
обстановка и электромагнитная совместимость на подстанциях».

Проектирование, монтаж, наладка и методическое обеспечение лабораторной
работы «Оценка электрических параметров земли».

(тема)

Пояснительная записка

Руководитель


(подпись, дата)

К.Т.Н., доцент
(должность, ученая степень)

С.В. Кузьмин
(инициалы, фамилия)

Выпускник


(подпись, дата)

К.В. Логинов
(инициалы, фамилия)

Красноярск 2018г.